

# Universidad de Alcalá

## Escuela Politécnica Superior

GRADO DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
AUTOMÁTICA INDUSTRIAL



**Trabajo Fin de Grado**

SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN DE PALPADORES  
PHASED ARRAY



ESCUELA POLITECNICA

**Autor:** Ángel Verges Moreno

**Tutor:** Carlos Andrés Luna Vázquez

2018



1. INDICE	
2. RESUMEN.....	2
3. SUMMARY.....	2
4. PALABRAS CLAVE.....	2
5. RESUMEN EXTENDIDO.....	3
6. MEMORIA.....	6
6.1. BASE TEÓRICA.....	6
6.1.1. ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END).....	6
6.1.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS ULTRASONIDOS.....	9
6.1.3. PALPADORES DE ULTRASONIDOS.....	13
6.2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	22
6.2.1 DEFECTOLOGÍA PALPADORES PHASED ARRAY Y PRUEBAS A REALIZAR.....	22
6.2.2 EQUIPO Y SOFTWARE.....	23
6.2.3 DESARROLLO DEL PROYECTO.....	25
6.3. CONCLUSIÓN.....	35
6.4. TRABAJO FUTURO.....	35
7. PLIEGO DE CONDICIONES.....	36
8. PRESUPUESTO.....	37
9. MANUAL DE USUARIO.....	39
10. BIBLIOGRAFÍA.....	43
ANEXO 1 FORMATO F-001.....	44
ANEXO 2 INFORME COMPLETO.....	45



## 2. RESUMEN

En este proyecto, se desarrolla un sistema destinado a comprobar el estado de los palpadores de ultrasonidos Phased Array. Dicho sistema consta de una herramienta software de ayuda a los operarios en la realización de las diversas pruebas, con el objetivo de conocer el estado del palpador mediante los parámetros obtenidos de este, lo cuál es fundamental para garantizar que los ensayos realizados con él son fiables. El software implementado, utilizando el entorno de desarrollo “*Labwindows CVI*”, permite de forma amigable la entrada de datos necesarios para la caracterización, generando automáticamente un informe en formato Word.

## 3. SUMMARY

In this project, a system is developed to check the status of Phased Array ultrasound probes. This system consists of a software tool to help the operators in the performance of the various tests, with the aim of knowing the status of the probe through the parameters obtained from it, which is essential to ensure that the tests carried out with it are reliable. The software implemented, using the "Labwindows CVI" development environment, allows the entry of necessary data for characterization in a user-friendly way, automatically generating a report in Word format.

## 4. PALABRAS CLAVE

Ensayos no destructivos, Palpador ultrasónico Phased Array, Caracterización de palpadores.



## 5. RESUMEN EXTENDIDO

Los ensayos no destructivos (END) son pruebas realizadas a cualquier material para determinar el estado interno, externo o ambos del material a inspeccionar, sin producir ningún tipo de deterioro en este. En la industria se utilizan diversas tecnologías para realizar este tipo de ensayos como pueden ser los rayos X, los campos electromagnéticos y los ultrasonidos, entre otras.

En los END basados en ultrasonidos se evalúa el comportamiento de ondas ultrasónicas dentro del material a inspeccionar de tal manera que según sea este comportamiento se puede deducir el estado del material. Para poder enviar y recibir estas ondas ultrasónicas es necesario el uso de un equipo al que se conectan los palpadores ultrasónicos, y que generalmente se denomina Equipo de Ultrasonidos.

Los palpadores son los encargados de transformar la energía eléctrica en ondas ultrasónicas (efecto piezoeléctrico inverso) y viceversa (efecto piezoeléctrico directo), las ondas generadas son enviadas al material a inspeccionar y recibidas por los palpadores. El equipo de ultrasonidos es el encargado de excitar a los palpadores e interpretar las ondas ultrasónicas procedentes de estos. Existen diferentes técnicas de END por ultrasonidos siendo una de ellas el uso palpadores Phased Array, la cual mejora significativamente el tiempo de inspección y la cobertura del barrido.

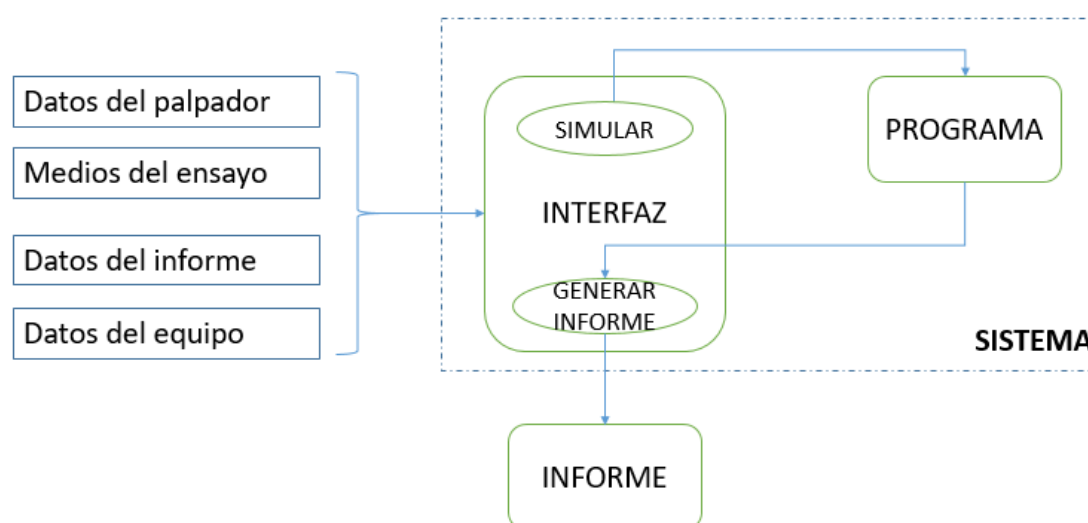
Los palpadores Phased Array son un tipo de palpador cuya principal característica es que están compuestos por varios elementos que se excitan por separado permitiendo inspeccionar piezas complejas con un único palpador, se podrían resumir como “n” palpadores en uno, siendo “n”, el número de elementos del palpador. Las principales características de estos palpadores son su número de elementos, sensibilidad, frecuencia central, ancho de banda y amortiguamiento.

Para una correcta caracterización de los palpadores Phased Array se deben realizar las siguientes pruebas:

- **Prueba de Sensibilidad:** En esta prueba se estudia la amplitud (energía) de los diferentes elementos del palpador Phased Array, para ello se ajustara cada elemento mediante unas condiciones de excitación, a un valor de amplitud de referencia, comparando estas condiciones de excitación se puede obtener la sensibilidad de cada elemento, con esto se detectan posibles defectos como el acoplamiento entre elementos, deterioro o rotura del piezoeléctrico y conexiones multipin.
- **Prueba de respuesta en frecuencia:** Fijando las condiciones de excitación, se analizan los parámetros de frecuencia central, ancho de banda y amortiguamiento de cada elemento, para ello es necesario obtener los parámetros de frecuencia inferior y frecuencia superior, por lo que es necesario obtener la transformada de Fourier de cada elemento. Con estos parámetros se pueden detectar defectos como deterioro del piezoeléctrico y daños en el amortiguador, también sirve para verificar que el palpador funciona en condiciones de frecuencia y anchos de banda deseados.

Al encontrarse una demanda creciente en el uso de los palpadores Phased Array es necesario crear un sistema capaz de realizar una comprobación estos de manera rápida y eficaz, por ello se decide realizar este proyecto con el objetivo de medir los principales parámetros de los mismos. Dado que no ha sido posible obtener un equipo de ultrasonidos real, se han desarrollado simulaciones para obtener datos similares a los obtenidos por un equipo real.

En el Diagrama 5.1. Se muestra un esquema general del proyecto mostrando los datos entrada que son introducidos por el operario, el desarrollo general del sistema y por último un informe donde se muestran todos los datos necesario de la caracterización, a continuación se describen los bloques principales.



**Diagrama 5.1 Esquema general de caracterización de palpadores**

- **Interfaz:** En la interfaz el operario introduce los datos del palpador (Número de serie, fabricante, modelo, frecuencia nominal y número de elementos), los medios del ensayo (Bloque, medio de acoplamiento y equipo utilizado en la caracterización), los datos del informe (Cliente, operario y persona que revisa el trabajo) y por último al tratarse de una simulación se introducen los datos del equipo, empleada en la caracterización (Tensión, ancho de pulso, apertura, PRF, frecuencia de muestreo y filtro), una vez introducidos los datos se pulsa el botón “Simulación”, obteniendo los diferentes parámetros, estos se muestran en la interfaz pudiendo realizar de nuevo otra simulación o generar el informe, para ello pulsa el botón “Informe”.
- **Programa:** Una vez dada la orden en la interfaz para iniciar la simulación, se recogen los datos introducidos en dicha interfaz, a continuación se realizan las simulaciones de los parámetros necesarios para la caracterización de las pruebas a realizar, finalmente se realizan los cálculos pertinentes para obtener todos los parámetros necesarios.
- **Informe:** Una vez realizada la simulación, se permite desde la interfaz generar el informe (solo es posible tras realizar la simulación). Se genera un informe con todos los datos relativos a las pruebas realizadas, para ello se crea un formato en Word.

Con la utilización de ese programa se detectan los defectos de los palpadores Phased Array de manera rápida y eficaz, lo cual es importante teniendo en cuenta que la tecnología Phased Array se encuentra en crecimientos en todos los sectores.



En lo que sigue, el trabajo queda estructurado de la siguiente forma, en el apartado 6.1 se comienza haciendo un estudio teórico donde se detallan los ensayos no destructivos, exponiendo alguno de ellos, a continuación se muestran las características de los ultrasonidos y por último se explican el funcionamiento, parámetros y tipos de palpadores ultrasónicos.

A continuación, en el apartado 6.2 se realiza la descripción del proyecto, donde primero se explican los tipos de defectos existente en los palpadores y las pruebas pertinentes para detectar estos defectos, seguido se muestra las características del equipo y software necesarios para realizar dichas pruebas y por último se realiza el desarrollo del proyecto, donde se explica detalladamente como se han realizado las diferentes partes del proyecto para obtener los parámetros solicitados en las pruebas para la evaluación de palpadores.

Posteriormente en el apartado 6.3 se expone una conclusión final y por último en el apartado 6.4 se mencionan posibles mejoras del proyecto.

## 6. MEMORIA

Como se ha mencionado en el apartado anterior, el objetivo de este proyecto es desarrollar un sistema para caracterizar el funcionamiento de los palpadores Phased Array. Para el mejor entendimiento del sistema desarrollado, en esta memoria se comienza explicando la base teórica de los palpadores de ultrasonidos, lo cual es fundamental para entender el proyecto, después se realiza una descripción detallada de como se ha realizado el proyecto, posteriormente se muestran unas conclusiones generales donde se describe las principales ventajas del sistema desarrollado y por último se hace referencia a posibles mejoras que se podrían añadir al proyecto.

### 6.1 BASE TEÓRICA

En este apartado se explican los conceptos básicos enfocados a los palpadores de ultrasonidos, comenzando por los ensayos no destructivos, continuando con los ultrasonidos (un tipo de ensayo no destructivo), posteriormente se explican los palpadores de ultrasonidos y por último las técnicas de ensayos (una de estas técnicas es la Phased Array).

#### 6.1.1 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END)

Para comenzar se explican los Ensayos no destructivos (END), se entiende como estos, cualquier tipo de prueba practicada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas ni mecánicas. Con el objetivo de determinar el estado interno, externo o ambos de dicho material.

Los principales objetivos de lo END son la detección de defectos (descubrir la existencia de discontinuidades o estados no deseados en un material, como grietas, corrosión, fugas,...), caracterización (evaluación de las características del material) y la medición (medidas de control sobre características definidas del componente).

Hay diversos tipos de END basados en la aplicación de fenómenos físicos tales como ondas acústicas, elásticas, emisión de partículas,... Algunos ejemplos de END son:

- **Líquidos penetrantes [1]:** Consiste en aplicar un líquido coloreado o fluorescente al material a inspeccionar, dicho líquido penetra en cualquier discontinuidad existente mediante el fenómeno de capilaridad. Se utiliza para detectar e identificar discontinuidades presentes en la superficie del material. En la [figura 6.1.1](#), como el líquido penetra en los diferentes defectos de la pieza a inspeccionar, mostrando estos de manera clara.



Figura 6.1.1 [Ejemplo ensayo PT](#)

- **Partículas magnéticas [1]:** Esta técnica consiste en aplicar un campo magnético sobre el material a inspeccionar, depositando pequeñas partículas magnéticas, de tal manera que estas se orientan siguiendo las líneas del campo, en presencia de algún defecto, estas líneas se distorsionan de tal manera que se detecta dicho defecto. En la [figura 6.1.2](#), se muestra un ejemplo explicativo de un END por campo magnético, donde se puede ver que las partículas se mueven según el campo magnético, pero cuando aparece algún defecto las partículas se van depositando en él, reflejado de esta manera el defecto.

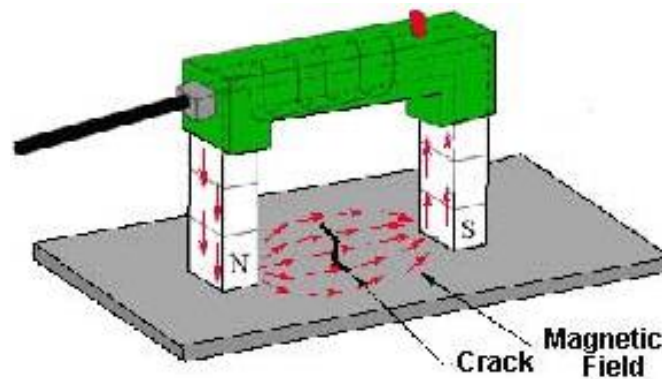


Figura 6.1.2 [Ejemplo ensayo MT](#)

- **Corrientes inducidas [1]:** Opera bajo el principio de inducción electromagnética. Se induce una corriente eléctrica en la superficie del material, creando un campo magnético, cuando existe un defecto en la pieza se producen variaciones en el campo magnético. Se emplea para detectar defectos superficiales. En la [figura 6.1.3](#), se produce una variación en el campo magnético al encontrar un defecto, este flujo es visualizado en un equipo de corrientes inducidas y de esta manera se refleja el defecto.

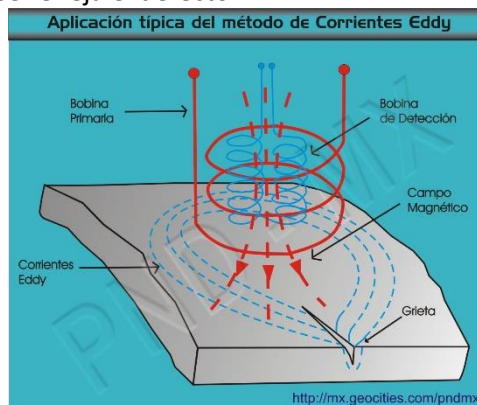


Figura 6.1.3 [Ejemplo ensayo ET](#)

- **Radiografía industrial [1]:** Técnica basada en la propiedad de radiaciones ionizantes, la cantidad de energía que atraviesa el material se plasma en una placa sensible a la luz. Permite detectar defectos superficiales o internos. En la [figura 6.1.4](#), se muestra el defecto en el interior de la pieza, mediante la radiación ionizante se observa el interior de la pieza.



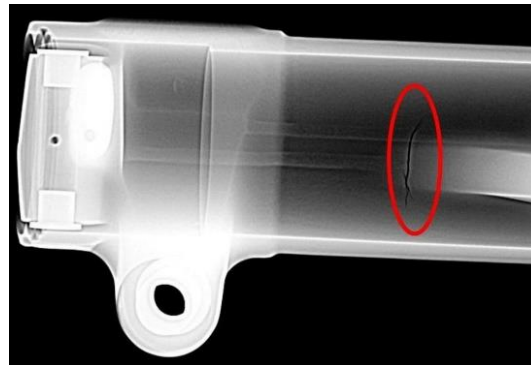


Figura 6.1.4 [Ejemplo ensayo RI](#)

- **Ultrasonidos (UT) [1]:** Este END es el que más se va a desarrollar debido a la importancia que tiene para este proyecto. Se considera Ultrasonidos frecuencias superiores a 20KHz. Consisten en la introducción de ondas mecánicas en el interior del objeto a inspeccionar, en caso de anomalía, la propagación esperada de estas ondas en el interior de la pieza se muestra alterada. En la [figura 6.1.5](#), se muestra un defecto en el interior de la pieza, se observa que en un equipo de ultrasonidos se ve el eco de la superficie y en eco del fondo de la pieza (estado bueno de la pieza) en la zona defectuosa aparece un eco intermedio indicando el defecto.

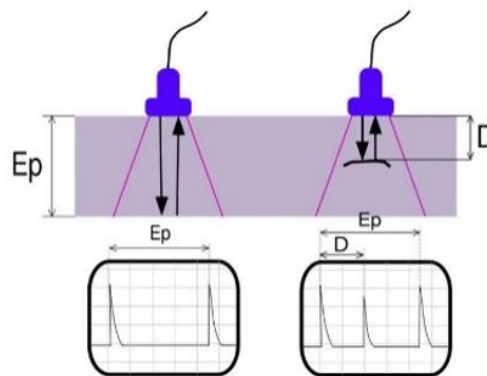


Figura 6.1.5 [Ejemplo ensayo UT](#)

En los ensayos no destructivos, ningún método de ensayo es completamente válido para la realización de una inspección completa de un componente, en la [tabla 6.1.1](#), se muestra un resumen de los métodos nombrados anteriormente.

Método	Tipo de discontinuidad	Tipo de material	Orientación preferente	Pro	Contra
Líquidos penetrantes	Superficial	Todos excepto porosos	Ninguna	Método global	Eliminar pinturas
Partículas magnéticas	Superficial o subsuperficial	Ferromagnético	Perpendicular al campo magnético	Método global	Eliminar pinturas
Radiografía	Superficial Interna	Todos	Paralelas a la dirección del haz	Dimensiona defectos	Protección radiológica
Corrientes inducidas	Superficial o subsuperficial	Conductores eléctricos	Perpendicular a corrientes inducidas	Dimensiona defectos	Uso ocasional
Ultrasonidos	Superficial Interna	Todos	Perpendicular al haz ultrasónico	Dimensiona defectos	Uso ocasional

Tabla 6.1.1. END [1]

## 6.1.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS ULTRASONIDOS

Una vez explicado los ensayos no destructivos se procede a explicar más detalladamente el ensayo no destructivo mediante la técnica de ultrasonidos, explicando los parámetros, los tipos de ondas y la iteración con los medios.

### 6.1.2.1 Parámetros

Los parámetros más característicos de una onda ultrasónica son el periodo o ciclo, la frecuencia, la longitud de onda, la amplitud y la velocidad, en la [figura 6.1.6](#) se pueden ver el periodo o ciclo, la frecuencia, la longitud de onda y la amplitud y en la [tabla 6.1.2](#) se muestran las velocidades del sonido en distintos materiales.

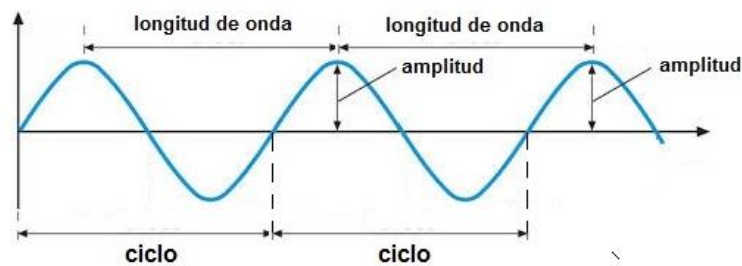


Figura 6.1.6 [Parámetros de onda ultrasónica](#)

- **Periodo o Ciclo (T):** Es el Tiempo que transcurre durante una oscilación completa. Su unidad es el segundo, la frecuencia (F), es el número de oscilaciones por unidad de tiempo. Es la inversa del periodo.  $F = \frac{1}{T}$ , Su unidad es el Hercio (Hz).
- **Longitud de onda:** Distancia entre dos partículas con el mismo estado de movimiento. Su unidad es el metro.
- **Amplitud:** Es el máximo desplazamiento de una partícula respecto a su posición de equilibrio. La medida utilizara suele ser en porcentaje (%) o decibelios (dB).

Materiales	Velocidad ( $m/s$ )
Aire	300
Agua	1480
Metacrilato	2700
Rexolite	2360
Acero	5960
Aluminio	6370
Titanio	6100

Tabla 6.1.2 Velocidad del sonido en materiales [1]

### 6.1.2.2 Tipos de ondas

La propagación de las ondas ultrasónicas depende de las propiedades elásticas del material como son el módulo de Young, módulo de cizalladura o el coeficiente de Poisson entre otros, además las partículas se mueven produciendo una vibración tal que se conserva la energía (energía cinética + energía potencial = constante).

En las ondas ultrasónicas existen distintos tipos de oscilaciones, siendo las principales las ondas longitudinales, transversales y superficiales.

- **Ondas longitudinales [1]:** Las partículas oscilan en la misma dirección que el sentido de propagación de la onda, como se muestra en la [figura 6.1.7](#), este tipo de ondas se propagan en sólidos, líquidos y gases.

La velocidad de la de una onda longitudinal ( $c_L$ ) se calcula como  $c_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$

$\lambda$ : Constante de Lamé,

$\mu$ : Módulo de cizalladura,

$\rho$ : Densidad del material

- **Ondas transversales [1]:** La vibración de las partículas es perpendicular al sentido de propagación, como se muestra en la [figura 6.1.7](#), estas ondas no se propagarán en gases ni líquidos por su condición de fluidos, puesto que no pueden transmitir este tipo de ondas al carecer de enlaces elásticos transversales, la velocidad de una onda transversal ( $c_T$ ), es  $c_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \approx 0,5 \cdot c_L$ .

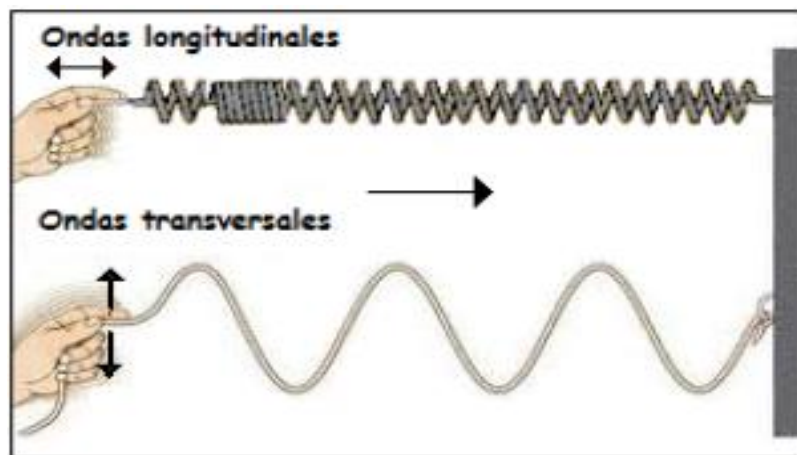


Figura 6.1.7 [Propagación de onda longitudinal y transversal](#)

- **Ondas superficiales o de Rayleigh [1]:** Las partículas se mueven en una trayectoria elíptica perpendicular a la superficie, solo se utilizan para defectos en la superficie, como se muestra en la [figura 6.1.8](#), al igual que las ondas transversales, no se propagan en líquidos ni gases, la velocidad de una onda superficial ( $c_S$ ) es  $c_S \approx 0,9 \cdot c_T$ .

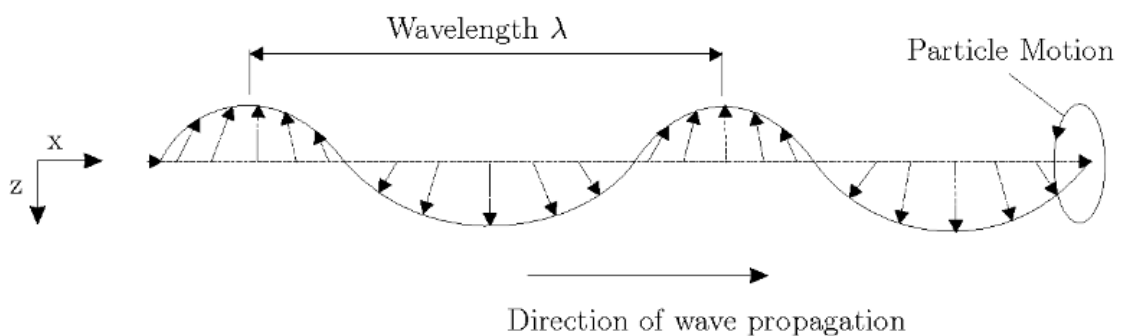


Figura 6.1.8 [Propagación de onda superficial](#)

### 6.1.2.3 Interacciones con el medio

En este apartado se explican una serie de fenómenos que se producen al interactuar los ultrasonidos con un medio, siendo estos fenómenos la reflexión, transmisión, relación entre reflexión y transmisión, refracción, conversión de modos y atenuación.

- **Reflexión [1]:** Es el fenómeno que se produce al incidir un haz en una interfase entre dos medios, una parte de la energía regresa al medio del cual proviene, como se muestra en la figura 6.1.9, se observa como parte de la energía se refleja en el mismo medio del que proviene al incidir sobre otro medio.

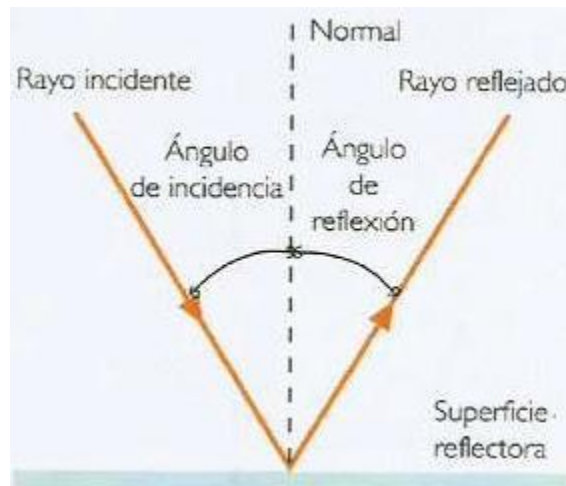


Figura 6.1.9 Fenómeno de reflexión [1]

- **Transmisión [1]:** Es el fenómeno que se produce al incidir una onda en la superficie de separación entre dos medios, una parte de la energía pasa al otro medio, como se muestra en la figura 6.1.10, se observa como parte de la energía se transmite al otro medio mientras otra parte se refleja en el mismo medio del que proviene.

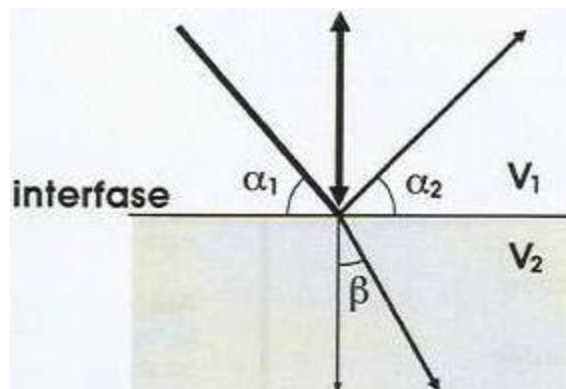


Figura 6.1.10 Fenómeno de transmisión [1]

- **Relación entre Reflexión y Transmisión [1]:** Se produce cuando una onda incide en la interfase entre dos medios, parte de la energía incidente se refleja (re) y otra parte se transmite (t), donde  $Z_n$  es la impedancia acústica del medio "n".

El coeficiente de reflexión para la energía es  $re = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2$ , el coeficiente de transmisión para la energía es  $t = \left( \frac{4 \cdot Z_2 \cdot Z_1}{(Z_2 + Z_1)^2} \right)$ , siendo la relación de energías es  $re + t = 1$ .

Los coeficientes de reflexión (Re) y transmisión (T) pueden ser expresados también para las amplitudes, donde el coeficiente de reflexión para amplitudes es  $Re = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$ , el coeficiente de transmisión para amplitudes es  $T = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1}$ , siendo la relación de amplitudes es  $T - Re = 1$ .

- **Refracción [1]:** Es el cambio de dirección que experimenta una onda al cambiar de medio. Sólo se produce si la onda incide oblicuamente sobre la superficie de separación de los dos medios y si éstos tienen velocidades de propagación del sonido diferentes, como se observa en la [figura 6.1.11](#), el rayo incidente se refracta en el nuevo medio cambiando el ángulo incidente a un nuevo ángulo de refracción.

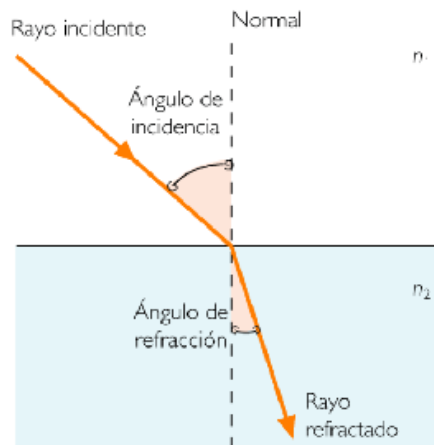


Figura 6.1.11 Fenómeno de refracción [1]

La Ley de Snell es la fórmula utilizada para calcular el ángulo de refracción de una onda al atravesar la superficie de separación entre dos medios siendo  $\frac{\sin(\theta)}{c_1} = \frac{\sin(\beta)}{c_2}$

$\theta$ : Ángulo de incidencia

$\beta$ : Ángulo de refracción

cn: Velocidad del sonido en el medio "n"

- **Conversión de modos [1]:** Es el fenómeno por el cual un tipo de onda es transformado en otro tipo de onda, al incidir de forma oblicua un haz sobre una superficie que separa dos medios. Esto ocurre debido a que en el punto de incidencia el movimiento de las partículas tiene una componente perpendicular y una paralela a la superficie, como se muestra en la [figura 6.1.12](#), una onda longitudinal ( $V_{L1}$ ), al cambiar de medio se transmiten ondas longitudinales y superficiales ( $V_{L2}, V_{S2}$ ), reflejándose también ondas longitudinales y superficiales ( $V_{L1}', V_{S1}$ ).

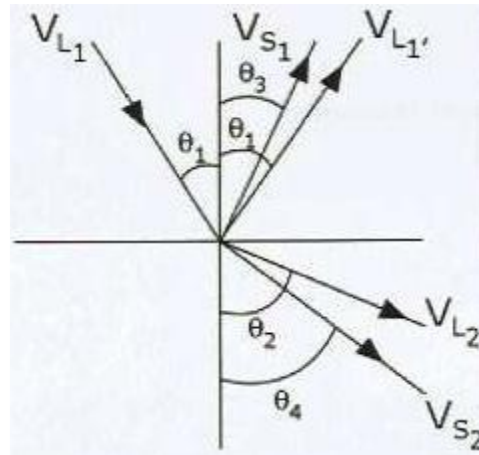


Figura 6.1.12 Fenómeno de refracción [1]

- **Atenuación [1]:** Es la pérdida de amplitud que experimenta la señal ultrasónica a medida que se propaga por un medio, en la [figura 6.2.13](#), se muestran distintos niveles de atenuación.

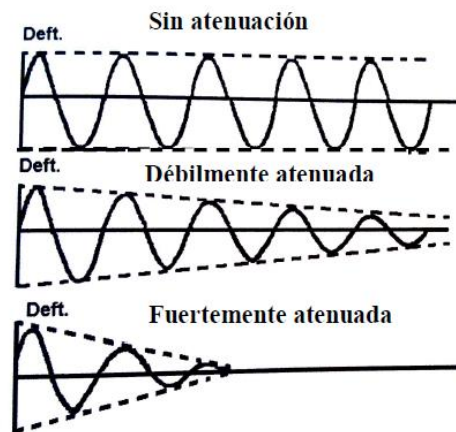


Figura 6.2.13 [Fenómeno de atenuación](#)

### 6.1.3 PALPADORES DE ULTRASONIDOS

Una vez conocidos los ultrasonidos, se procede a explicar que son los palpadores de ultrasonidos, también llamados transductores, los palpadores son los encargados de conducir las ondas ultrasónicas al objeto a inspeccionar, su funcionamiento consiste en convertir los impulsos eléctricos en energía mecánica (emitir señal ultrasónica, para ello es importante los parámetros frecuencia y energía) y viceversa (recibir señal ultrasónica, para ello es importante una alta resolución y rendimiento óptimo) por el fenómeno piezoeléctrico, el cual les permite vibrar, y generar las ondas ultrasónicas.

#### 6.1.3.1 Piezoelectricidad

El fenómeno de piezoelectricidad es fundamental para que los palpadores funcionen, pues el elemento activo de un transductor es el que realiza la conversión de energía. En el caso de los transductores ultrasónicos lo más común es que las láminas activas sean elementos piezoeléctricos, en la [tabla 6.1.3](#), se muestran las características de materiales piezoeléctricos, existen dos tipos de efectos piezoeléctricos directo e inverso.

Materiales	Coeficiente		Densidad Kg/m <sup>3</sup>	Velocidad longitudinal m/s	Impedancia acústica Kg/m <sup>2</sup> s	Punto de Curie °C
	Transmisión m/v	Recepción Vm/N				
Cuarzo	2	50	2650	5760	15264	573
Sulfato de litio	16	175	2060	4720	9723	75
Titanato de bario	140	15	5700	4400	25080	120
PZT	300	120	7500	3500	30000	280
Zirconato de plomo	260	24	5800	3300	16000	340

Tabla 6.1.3 Características de materiales piezoeléctricos [1]

- **Efecto piezoeléctrico directo [1]:** Al aplicar una fuerza mecánica sobre un elemento piezoeléctrico, éste genera cargas en las caras perpendiculares a la dirección del esfuerzo, como se describe en la [figura 6.1.14](#), este efecto está basado en la recepción de señales ultrasónicas.

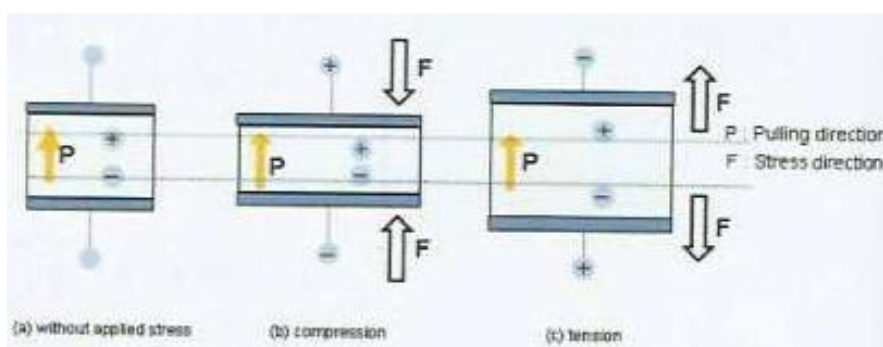


Figura 6.1.14 Efecto piezoeléctrico directo [1]

- **Efecto piezoeléctrico inverso [1]:** Al aplicar un voltaje sobre un elemento piezoeléctrico, éste se deforma generando una energía mecánica, como se observa en la [figura 6.1.15](#). Es este efecto se basa la emisión de señales ultrasónicas.

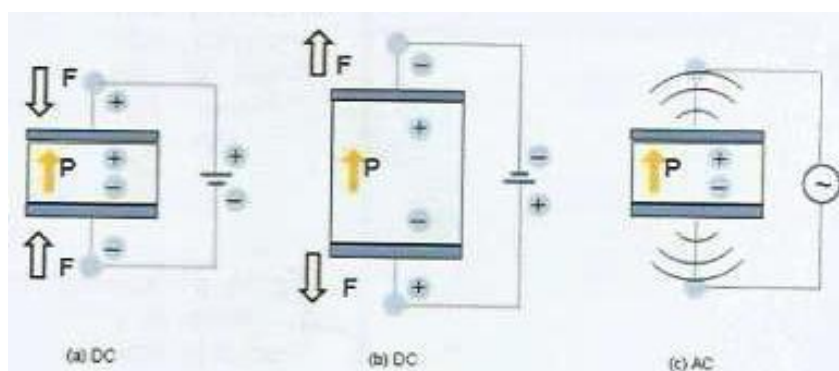


Figura 6.1.15 Efecto piezoeléctrico inverso [1]

### 6.1.3.2 Características del palpador

En la [figura 6.1.16](#), se muestran las diferentes partes de un palpador, donde El conector es el encargado de conectar el palpador al equipo de ultrasonidos, la carcasa es la parte exterior que protege a la parte interna, el aislamiento interno reduce posible distorsiones que se puedan producir del exterior y es en lazo de unión entre la parte interna y la carcasa, el amortiguador se utiliza para amortiguar la señal ultrasónica (Ver a continuación), el



transductor (elemento piezoeléctrico) y las conexiones eléctricas son los encargados de realizar el fenómeno de piezoelectricidad (explicado en el punto anterior), por último, la suela es la que está en contacto con el medio a inspeccionar y el palpador. A continuación se van a mostrar los principales parámetros de un palpador ultrasónico.

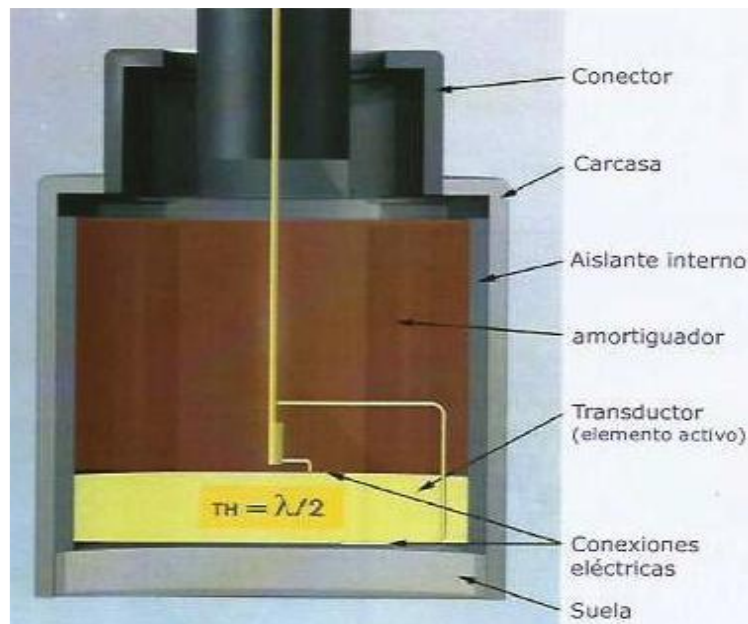


Figura 6.1.16 Partes de un palpador [1]

- **Frecuencia nominal (f) [1]:** Se encuentra definida por el espesor (th) y la velocidad del material piezoeléctrico (v), se calcula como  $f = \frac{v}{2 \cdot TH}$

La frecuencia se elige en función de la sensibilidad de detección deseada, el tamaño mínimo detectable por una onda ultrasónica es equivalente a la mitad de la longitud de onda.

- **Diámetro del elemento piezoeléctrico [1]:** Se debe elegir de acuerdo con el tamaño del reflector buscado y la posición del mismo dentro del material (longitud de onda y campo cercano).
- **Amortiguación o damping [1]:** La amortiguación modifica la resolución y el ancho de banda (bandwidth) de un palpador, depende del amortiguador del palpador.
- La resolución de un palpador es la capacidad de distinguir entre dos reflectores pequeños muy cercanos entre ellos, en la [figura 6.1.17](#), se muestra la separación mínima para poder distinguir dos reflectores muy pequeños

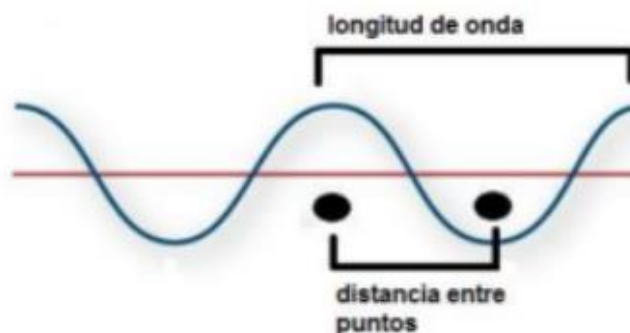


Figura 6.1.17 [Resolución](#)



- El ancho de banda consiste en la relación entre energía y frecuencia, se realiza mediante la transformada de Fourier de la señal ultrasónica, en la [figura 6.2.18](#) se distinguen dos transformadas de Fourier correspondientes a una señal ultrasónica obtenida, mostrando en ellas la diferencia entre una señal muy amortiguada (DAMPING) y otra menos amortiguada (NO DAMPING).

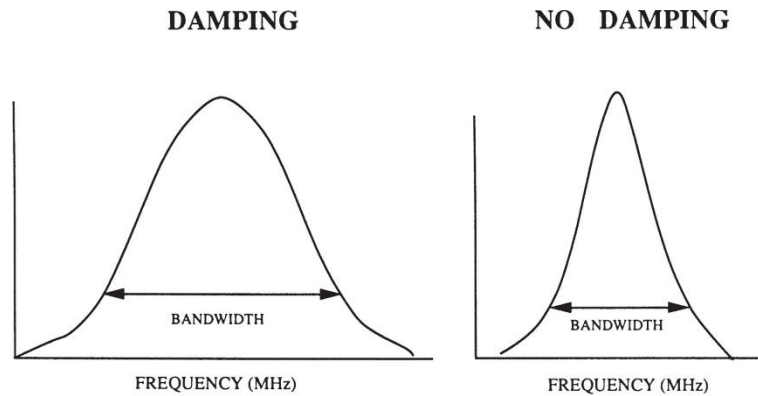


Figura 6.1.18 [Ancho de banda](#)

#### 6.1.3.3. Tipos de palpadores

Por último, se va a proceder a exponer diferentes tipos de palpadores, existen numerosos tipos de palpadores de ultrasonidos, que vienen de diferentes clases y con una gran variedad de diámetros de elementos, frecuencias y conectores, aun así los clasificaremos en palpadores de haz recto, palpadores de haz angular, palpadores de inmersión:

- **Palpadores de haz recto [1]:** (Ver [figura 6.1.19](#)), Su ángulo de incidencia es de  $0^\circ$ , este tipo de palpadores trabaja en contacto con el material a inspeccionar, para que el ultrasonido incida en el material por contacto, pueden ser monocristal (Un elemento), es decir el mismo elemento es el encargado de emitir y recibir las ondas ultrasónicas o bicristal (dos elementos), es decir un elemento emite la señal y el otro la recibe.



Figura 6.1.19 [Palpadores de haz recto](#)

- **Palpadores de haz angular [1]:** (Ver [figura 6.1.20](#)), Transmiten el ultrasonido con un ángulo de incidencia, trabajan en contacto y como ocurre con los palpadores de haz recto pueden ser monocristales o bicristales.



Figura 6.1.20 [Palpadores de haz angular](#)

- **Palpadores de inmersión [1]:** (ver [figura 6.1.21](#)), son Palpadores adaptados al agua, el ultrasonido es transmitido y recibido mediante inmersión en agua o por chorro de agua hasta la pieza a inspeccionar.



Figura 6.1.21 [Palpadores de inmersión](#)

- **Palpadores Phased Array [1]:** (Ver [figura 6.1.22](#)), El palpador está dividido en pequeños elementos y cada elemento está conectado por separado, lo que permite realizar diferentes configuraciones de funcionamiento para un mismo palpador, se podrían resumir como “n” palpadores en uno, siendo “n”, el número de elementos del palpador Phased Array, todos los elementos son lineales ( $0^\circ$ ), aunque es posible crear leyes focales mediante equipos de ultrasonidos Phased Array, para modificar diferentes parámetros como el tipo de disparo, cantidad de elementos activos, ángulos, etc, lo que permite mayor flexibilidad y ahorro de tiempo de inspección es por ello que cada vez son más utilizados.

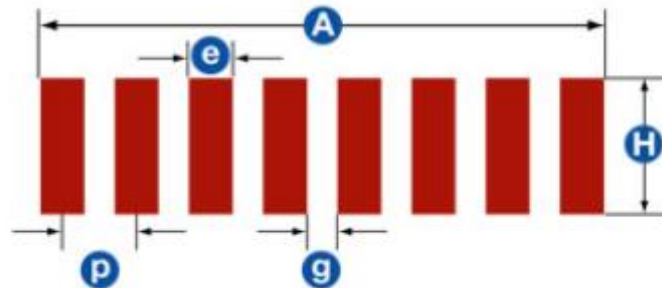


Figura 6.1.22 [Palpadores Phased Array](#)

Existen muchos tipos de palpadores Phased Array, los cuales se pueden distinguir según varios parámetros, tamaño de elementos, número de elementos, geometría del palpador, frecuencia y tipo de conector.

- **Tamaño de los elementos:** En la [figura 6.1.23](#), se muestra las diferentes dimensiones relacionadas con los elementos de un palpador Phased Array. A menor anchura de los elementos, mayor es la orientación del haz, pero un área grande requiere más elementos, lo que lleva a mayores costes.

### Dimensional Parameters of Phased Array Probe



$N$  = total number of elements in the array  
 $A$  = total aperture in steering or active direction  
 $H$  = element height or elevation. Since this dimension is fixed, it is often referred to as the passive plane.  
 $p$  = pitch, or center-to-center distance between successive elements  
 $e$  = width of an individual element  
 $g$  = spacing between active elements

Figura 6.1.23 Dimensiones palpador Phased Array

- **Geometría del palpador:** Como se muestra en la [figura 6.1.24](#), dependiendo de la geometría de como estén fabricados, se pueden encontrar diversos tipos de palpadores para diferentes tipos de ensayos, siendo el tipo de geometría más común la geometría lineal Array.

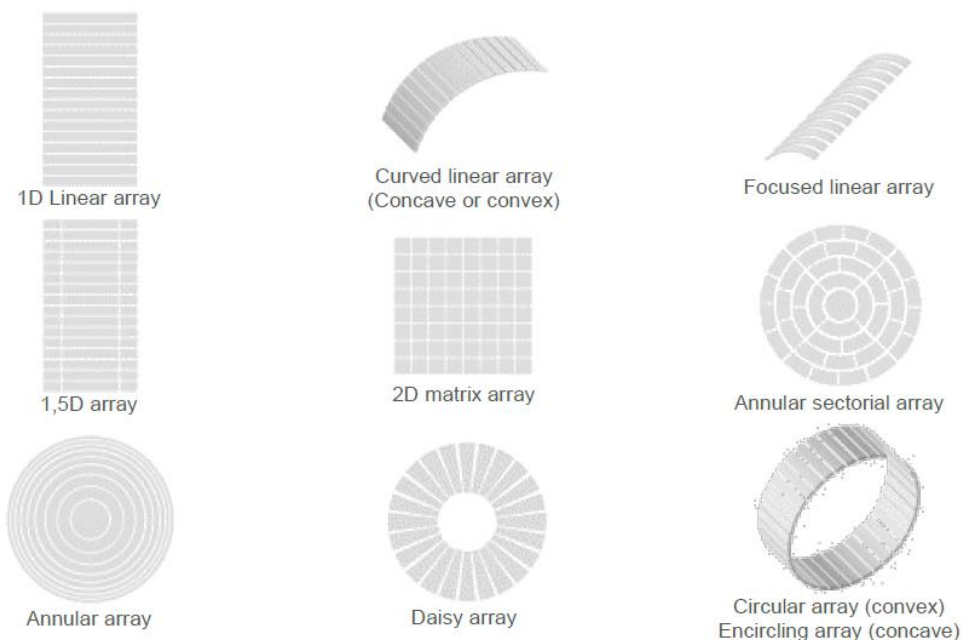


Figura 6.1.24 Geometría palpadores Phased Array

- **Número de elementos:** Los más comunes tienen entre 16 y 128 elementos, aunque hay algunos con más de 256. Un mayor número de elementos aumenta la capacidad de focalización y el área de inspección, pero también aumentan los costes y la dificultad de fabricación.

- **Frecuencia:** La inmensa mayoría está en el rango de 0,2 – 10 MHz, aunque existen algunos palpadores con frecuencias más altas y más bajas, a baja frecuencia se incrementan la penetración, y a una frecuencia alta se aumenta la resolución.
- **Tipos de conectores:** Dependiendo del uso del palpador y sobre todo del equipo con el que se vaya a usar, el conector del palpador varía, siendo los más comunes los conectores Hypertronic, Ipex y Phasor, en muchos casos es necesario usar adaptadores para poder conectar palpadores a un equipo con conectores diferentes entre ellos.

**Hypertronic:** en la [figura 6.1.25](#), se muestra este tipo de conector, se utiliza en equipos de M2M (MultiX y Multi2000 series), entre otros.



Figura 6.1.25 [Conector Hypertronic](#)

**Ipex:** en la [figura 6.1.26](#), se muestra este tipo de conector, se utiliza en equipos de Olympus (Serie MX) y Tecnatom (FPA-128M), entre otros.



Figura 6.1.26 [Conector Ipex](#)

**Phasor:** En la [figura 6.1.27](#), se muestra este tipo de conector, utilizado en equipos de General Electric (Phasor series), entre otros.



Figura 6.1.27 [Conector Phasor](#)

#### 6.1.3.4 Técnicas de ensayo

Por último para terminar con la base teórica se explican las diferentes técnicas de ensayos con ultrasonidos, las más comunes son pulso-eco, transmisión y Phased Array.

- **Pulso-eco [1]:** Inspección por análisis del haz ultrasónico. Las ondas son generadas en el palpador y se propagan en la pieza, puede ser en contacto o inmersión, En la [figura 6.1.28](#) se muestra como el palpador envía y recibe la señal ultrasónica, en el equipo se diferencia claramente el pulso de emisión, el eco del defecto y el eco de fondo.

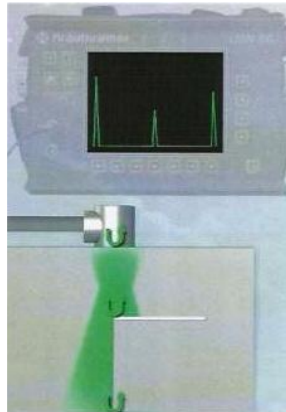


Figura 6.1.28 Técnica pulso eco [1]

Las principales ventajas son la indicación de la posición del reflector, es una técnica fácil de implementar y permite la inspección en campo, en cambio las principales desventajas son que la técnica no es apropiada para materiales con alta atenuación y el acoplamiento acústico no es constante.

Sus principales usos son la verificación de bridas forjadas en distintos materiales, inspección de cerámicas y piezas al carbono, inspección de soldaduras Y detección y cuantificación de porosidades.

- **Transmisión [1]:** Para la técnica de transmisión, es necesario utilizar dos palpadores, analiza la cantidad de energía transmitida de un palpador emisor a otro receptor, esta técnica puede ser empleada en contacto en inmersión total o mediante chorro de agua, en la [figura 6.1.29](#), se muestra como un palpador emite señal y el otro la recibe, en el equipo de ultrasonidos se observa como se ve el pulso de emisión y el eco de fondo se ve pequeño debido a que el defecto no deja llegar toda la energía al palpador de recepción.

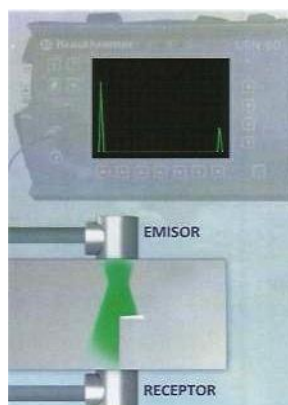


Figura 6.1.29 Técnica de transmisión [1]

Las principales ventajas de esta técnica es que se puede usar en materiales con alta atenuación y en materiales compuestos con estructura de panal de abeja, en consecuencia las principales desventajas son que no facilita posición u orientación de la indicación y es esencial que los dos palpadores estén perfectamente y continuamente alineados,

Su uso principalmente es en inspección de materiales con alta atenuación, aunque también se utilizan en materiales compuestos.

- **Phased Array [1]:** esta técnica se basa en palpadores Phased Array, mejora significativamente el tiempo de inspección y la cobertura del barrido en comparación con palpadores convencionales, además se pueden realizar distintas configuraciones para excitar los elementos, esto es lo que se conoce como ley focal, en la [figura 6.1.30](#), se muestra como el Palpador Phased Array realiza un barrido más ancho que con uno convencional y es capaz de detectar el tornillo en este caso dentro de la pieza.



Figura 6.1.30 Técnica Phased Array [1]

Las principales ventajas son que se permite el ajuste del haz ultrasónico para obtener una distancia focal determinada, permite el ajuste del ángulo del haz, se puede realizar la inspección de una pieza con múltiples ángulos simultáneamente con un único palpador, Relativamente fácil inspección de áreas complejas o pequeñas, se realiza la detección y el dimensionamiento en la misma pasada, permite la trazabilidad y el registro de los ensayos, no obstante las principales desventajas son los problemas de accesibilidad por mayor tamaño del palpador y menor sensibilidad.

Los principales usos de este tipo de técnica son la inspección aeronáutica, inspección de piezas complejas con un único palpador, ensayo desde un único lado de la pieza, dimensionamiento de grietas y mantenimiento.

## 6.2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

En este apartado se va a describir de manera detallada el desarrollo del proyecto de caracterización de palpadores Phased Array, cuya finalidad es comprobar el estado de dichos palpadores y de esta manera, el destinatario del palpador decide si es válido o no para sus operaciones. Para ello, primero se van a describir las diferentes anomalías que pueden aparecer en los palpadores Phased Array y las pruebas a realizar para detectar dichas anomalías, a continuación, se describe las características que debe presentar el equipo y software para realizar la caracterización de manera clara y eficaz, una vez que se tienen claras las pruebas a realizar y el equipo y software a realizar, se detalla la programación para la realización de las pruebas.

### 6.2.1 DEFECTOLOGÍA PALPADORES PHASED ARRAY Y PRUEBAS A REALIZAR

La finalidad del proyecto es conseguir un sistema capaz de detectar los principales problemas que se pueden encontrar en un palpador de ultrasonidos Phased Array, para ello es necesario conocer los posibles defectos y las pruebas a realizar para detectarlos.

#### 6.2.1.1 Defectología

Con el uso es común que los palpadores se degraden con el tiempo, en este apartado se mencionan los defectos que se producen en los palpadores Phased Array y los parámetros que afecta, en la [tabla 6.2.1](#), se muestran las diferentes anomalías que se pueden presentar en un palpadores Phased Array y el modo de detección de dicha anomalía, las cuáles se detallan a continuación.

Anomalía	Modo de detección
Acoplamiento entre elementos	Sensibilidad + Visualmente suela deteriorada
Deterioro del piezoeléctrico	Frecuencia central y/o Sensibilidad
Rotura piezoeléctrico	Sin señal
Degradación de las conexiones	Sin señal + Visualmente cable deteriorado
Conexión interna de conectores multipin	Sensibilidad + Elementos sin señal
Daños del material amortiguador	Duración de la señal y ancho de banda

6.2.1. Tabla de anomalías

- Acoplamiento entre elementos: Con el uso, es común que la suela de los palpadores se desgaste, afectando de distinta manera a los diferentes elementos. Esto afecta a la sensibilidad común de los elementos y se puede observar visualmente en la suela del palpador.
- Deterioro o rotura del piezoeléctrico: Debido a la multitud de vibraciones sufrida en el uso, tensiones de excitación inadecuadas u otros factores de uso, es posible que algunos elementos pierdan energía e incluso se produzca una vibración no deseada, Esto puede afectar a la sensibilidad común de los elementos y también a la frecuencia de vibración. En caso de rotura del piezoeléctrico no se produce señal ninguna, ya que no se produce la vibración.





- Degradación de las conexiones: Puede ocurrir que el cableado se haya degradado debido a fuertes torsiones, estiramiento y/o aplastamiento de los cables de conexión del palpador, pudiendo ocasionar la pérdida de señal de algunos elementos. Se puede detectar mediante inspección visual del cableado.
- Conexión interna de conectores multipin: Es posible que a la hora de realizar una reparación o un ajuste, se haya conectado los pines erróneamente y se conecten más de un elemento en el mismo lugar. Esto afecta a la sensibilidad de los elementos, ya que si se ha conectado dos elementos en un mismo lugar (mismo pin), la sensibilidad de este, será la suma del elemento conectado correctamente más el elemento conectado erróneamente, mientras que el elemento que se encuentra erróneamente conectado no tendría señal.
- Daños del material amortiguador: Al igual que ocurre el deterioro del piezoeléctrico, también puede ocasionar daños en el material amortiguador debido a fuertes excitaciones, mucho tiempo de uso,... Esto afecta a la duración del pulso y por lo tanto al ancho de banda.

#### 6.2.1.2 Pruebas

Una vez conocidas las anomalías y el modo de detección de estas, ya se pueden deducir las diferentes pruebas a realizar para una correcta caracterización de los palpadores ultrasónicos Phased Array, siendo estas la prueba de sensibilidad y la prueba de respuesta en frecuencia.

- Prueba de sensibilidad: En esta prueba se estudia la amplitud de los diferentes elementos del palpador Phased Array, para ello se ajustara cada elemento mediante unas condiciones de excitación, a un valor de amplitud de referencia, comparando estas condiciones de excitación se puede obtener la sensibilidad de cada elemento, como se ha visto en la [tabla 6.2.1](#), con esto se detectan posibles defectos como el acoplamiento entre elementos, deterioro o rotura del piezoeléctrico y conexiones multipin.
- Prueba de respuesta en frecuencia: Con las condiciones de excitación anteriores, se analizan los parámetros de frecuencia central, ancho de banda y amortiguamiento de cada elemento, para ello es necesario obtener los parámetros frecuencia inferior y frecuencia superior, por lo que es necesario obtener la transformada de Fourier de cada elemento. Como se ha visto en la [tabla 6.2.1](#), con estos parámetros se pueden detectar defectos como deterioro del piezoeléctrico y daños en el amortiguador, también sirve para verificar que el palpador funciona en condiciones de frecuencia y anchos de banda deseados.

#### 6.2.2 EQUIPO Y SOFTWARE

En este apartado se van a establecer las características del equipo de ultrasonidos y del software necesarias para realizar la caracterización de los palpadores.

##### 6.2.2.1 Equipos

Los equipos de ultrasonidos son los encargados básicamente de generar impulsos eléctricos cortos, que excitan al palpador y de recibir e interpretar las ondas ultrasónicas en función de la base de tiempos y su amplitud procedente del palpador, para ello cuenta con parámetros configurables, siendo los más característicos los nombrados en la [tabla 6.2.2](#).



Cualquier equipo del mercado que cumpliera los principales parámetros nombrados en la [tabla 6.2.2](#), el requisito de realizar transformadas de Fourier de señales y poder ser configurable por un software externo, sería válido para este proyecto, aun así, no es posible contar con un equipo real debido a la complejidad de obtener licencia, disponibilidad del equipo,...

Parámetro	Descripción
Tensión	Amplitud del impulso eléctrico encargado de excitar al palpador, consisten en impulsos cortos que llegan a cientos de voltios (V), normalmente tiene un valor entre 20v y 400v.
Ancho de pulso	Es la duración del impulso eléctrico, se mide en nanosegundos (ns). Se suele configurar como $Ancho\ de\ pulso = \frac{1}{2 \cdot f}$ donde f es la frecuencia nominal del palpador.
Ganancia	Expresa la relación entre la amplitud de la señal de salida respecto a la señal de entrada, se mide en decibelios (dB), $Ganancia = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{V_s}{V_e} \right)$ donde Vs es la tensión de salida y Ve la tensión de entrada, normalmente tienen un valor entre 0dB y 40dB.
Frecuencia de muestreo	Número de muestras por segundo que se adquieren para realizar la representación, se mide en Megahercios (MHz), normalmente con un valor entre 10MHz y 125MHz.
Filtro	Se utiliza para discriminar una gama de frecuencias.
Frecuencia de repetición de impulsos (PRF)	Como su nombre indica, establece la frecuencia a la que se emiten los pulsos ultrasónicos para muestrear, se mide en Hercios (Hz), normalmente entre 1Hz y 200Hz.
Apertura	Solo para equipos Phased Array, consiste en la cantidad de elementos sobre el que se lleva a cabo el barrido, normalmente entre 1 y 16.
Número de elementos	Solo para equipos Phased Array, configura el equipo para activar la cantidad de elementos pertinentes, normalmente entre 1 y 128.

Tabla 6.2.2 Parámetros equipo Phased Array

#### 6.2.2.2 Software

El software debe ser capaz de crear interfaz, comunicarse con el equipo de ultrasonidos, dibujar gráficas y generar informes, como hemos visto anteriormente, no es posible contar con un equipo real, la solución es simular unos datos lógicos que se pudieran obtener de un equipo real, el software para llevar a cabo el proyecto es Labwindows debido a que es un programa intuitivo, con el que es sencillo crear y desarrollar tanto una interfaz gráfica como generar informes, en la [tabla 6.2.2](#), se muestran los parámetros más significativos de un equipo real Phased Array.

La forma de representación para desarrollar el proyecto sería la señal en Radiofrecuencia, ya que en este tipo de señal no se produce ninguna rectificación y es función de amplitud (% , dB,...) y distancia (us, mm,...), con esta representación se obtiene la transformada de Fourier.

### 6.2.3. DESARROLLO DEL PROYECTO

En este apartado se va a explicar cómo se desarrolla los distintos apartados del proyecto, para ello se va a dividir el proyecto en tres puntos principalmente que son la interfaz, la programación y el informe, como se muestra en el [diagrama 6.2.1](#), el software se divide en tres partes principales las cuáles son interfaz, programación e informe

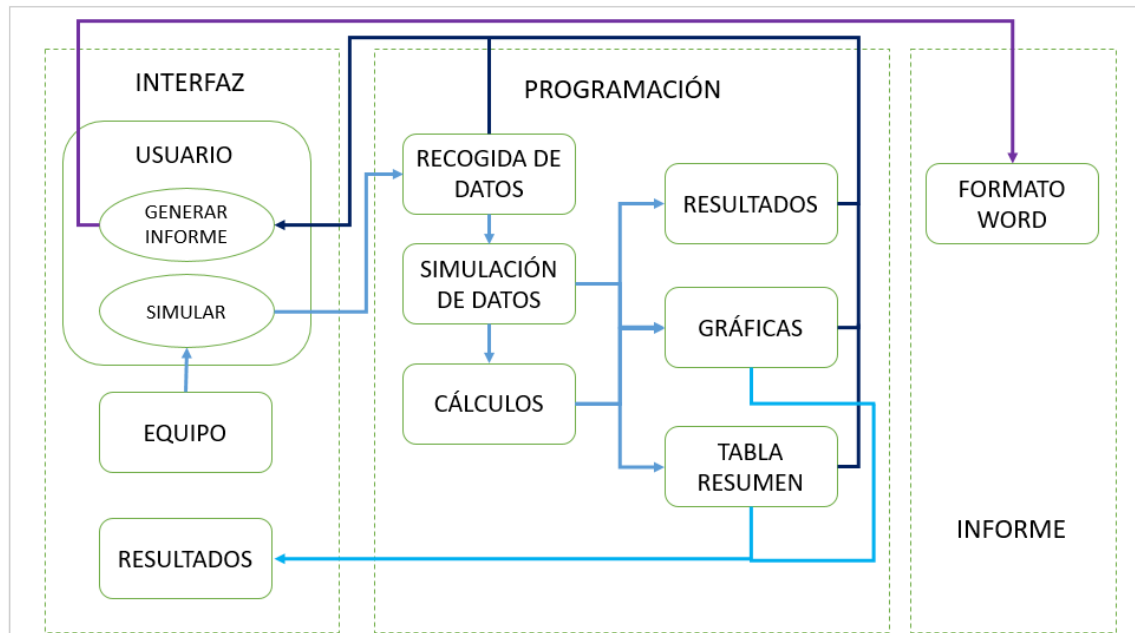


Diagrama 6.2.1 Esquema de caracterización de palpadores

#### 6.2.3.1 Interfaz

Se crea una interfaz tanto para introducir datos como para mostrar resultados, por ello, a su vez en la interfaz se distinguen tres apartados que son los datos a introducir por el operario, la simulación de datos del equipo ultrasónico y los resultados obtenidos, como se muestra en la [figura 6.2.1](#).

- **Datos introducidos por el operario:** Se distinguen tres partes, la primera es el apartado “DATOS DEL PALPADOR” donde se hace referencia al palpador a caracterizar, la segunda materiales y equipos utilizados, se hace referencia a los materiales y equipo utilizado para realizar la caracterización y por último datos del informe, se hace referencia a los datos que caracterizan el informe, en la [figura 6.2.1](#), “DATOS A INTRODUCIR POR EL OPERARIO”, se muestra la interfaz donde se reflejan las tres partes (datos del palpador, equipos y materiales y datos del informe), además se muestran los botones de simular, generar informe y cerrar.
- En el apartado “DATOS DEL PALPADOR” se muestran los campos, Número de serie (es la identificación del palpador), Fabricante (Empresa que ha fabricado el palpador), Modelo (el tipo de palpador), Frecuencia nominal (La frecuencia del palpador) y Elementos (Número de elementos que tiene el palpador).
- En el apartado “MEDIOS DEL ENSAYO” se muestran los campos, Bloque (Es el bloque empleado para obtener las señales), Medio de acoplamiento (Indica el medio utilizado para acoplar el palpador al bloque) y Equipo (Es el equipo ultrasónico empleado).



- En el apartado “DATOS DEL INFORME” se muestran los campos, Cliente (Indica el destinatario del palpador y por lo tanto es quien recibe la caracterización de este), Operario (persona encargada de realizar la caracterización), Revisado (persona encargada de supervisar la caracterización realizada por el operario).
- Se muestran tres botones los cuales son “SIMULACIÓN” (al pulsarlo comienza la simulación, realizando los procesos que se muestran en el apartado “Programación”), “GENERAR INFORME” (botón inicialmente oculto hasta obtener todos los datos, una vez pulsado, se obtiene el informe con todos los datos correspondientes), “CERRAR” (Finaliza todo el proceso, cerrando todo) y el botón “ESTADO” (Rojo se simulan defectos en el palpador y verde el palpador se encuentra en buen estado).

**DATOS A INTRODUCIR POR EL OPERARIO**

DATOS DEL PALPADOR	MEDIOS DEL ENSAYO	DATOS DEL INFORME
Número de serie 000001	Bloque Bloque Rexolite, B-002	Cliente UAH
Fabricante Olympus	Medio de acoplamiento Agua	Operario Ángel Verges
Modelo Array lineal	Equipo Tecnatom, FPA E-001	Revisado TFG
Frecuencia nominal [MHz] 5.00	Estado 	
Elementos 32		

**SIMULAR** **GENERAR INFORME**

**CERRAR**

**SIMULAR DATOS DEL EQUIPO DE ULTRASONIDOS**

Tensión [V] 100	Apertura 1	Frecuencia de muestreo [MHz] 20
ancho del pulso [ns] 100	PRF [Hz] 20	
Filtro Ninguno		

Figura 6.2.1 Interfaz

- **Simulación de datos del equipo ultrasónico:** En este apartado, se simulan los datos característicos de un equipo de ultrasonidos, los cuáles se han explicado en el apartado [6.2.2 EQUIPOS Y SOFTWARE](#). En la [figura 6.2.1](#), se muestran los diferentes parámetros que se obtendrían de un equipo real, el programa nos da la opción de introducir estos de manera manual, como si fueran los que se obtuvieran del equipo real, es importante conocer la configuración del equipo en el ensayo, ya que en caso de volver a caracterizar el mismo palpador, es más fácil observar la evolución de este.
- **Resultado:** En esta parte se muestran los resultados obtenidos mediante gráficas y tabla resumen de los resultados obtenidos, en apartado [6.2.3.4 Ejemplo de simulación](#), se muestra un ejemplo de simulación, en la [figura 6.2.6](#) correspondiente a dicho apartado, se observa la parte “RESULTADOS” de la interfaz, mostrando las gráficas y una tabla resumen en donde se indican el máximo, mínimo, media y la desviación estándar de los parámetros obtenidos más característicos (Sensibilidad, frecuencia central, ancho de banda y amortiguamiento) en función de cada elemento, de esta manera, en caso de tener que repetir el ensayo, no es necesario generar el informe sino que directamente se vuelve a caracterizar mediante el botón “SIMULACIÓN”.

### 6.2.3.2 Programación

Este apartado comienza tras pulsar el botón “SIMULACIÓN” correspondiente a la Interfaz, en este apartado se lleva a cabo la programación del proyecto, para ello, se consideran tres partes principalmente, recogida de datos, simulación y cálculos, en el [Diagrama 6.2.2](#), se muestra la estructura de la programación llevada a cabo para realizar el proyecto, para ello se recogen los datos introducidos en la interfaz, a continuación se realizan las simulaciones y después los cálculos, por último se generan los Resultados, la tabla resumen y las gráficas.

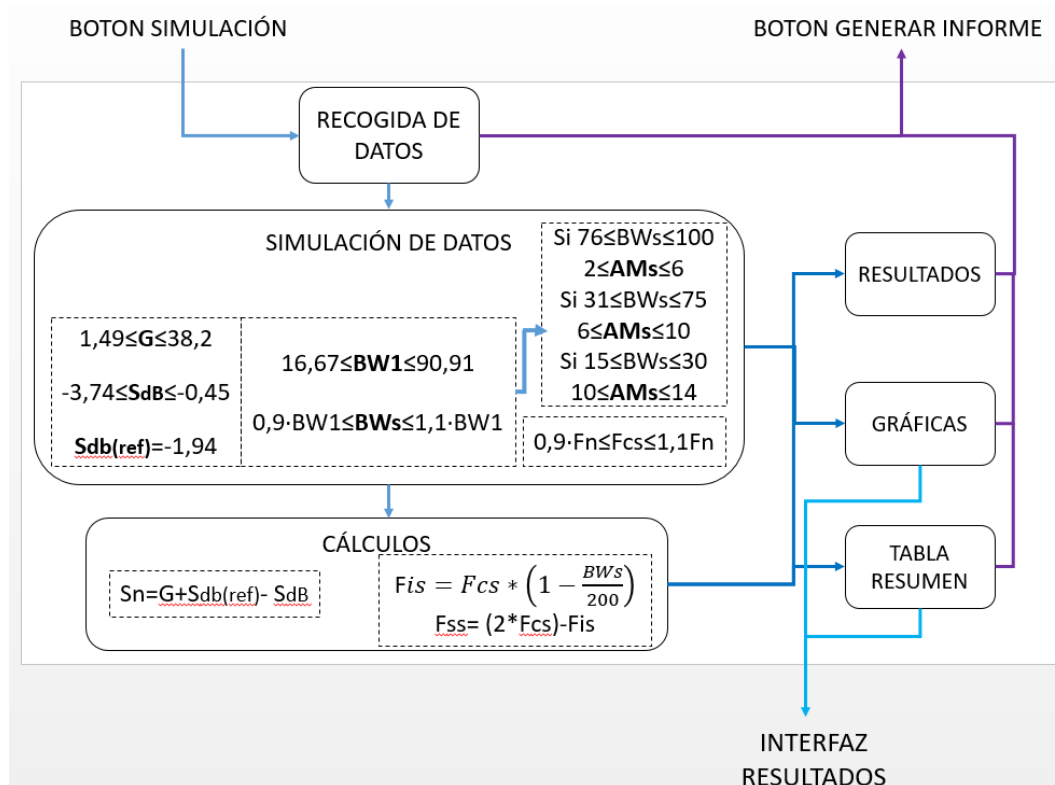


Diagrama 6.2.2 Esquema programación

- **Recogida de datos:** Se registran todos los datos introducidos en la interfaz, de esta manera, estos pueden ser reflejados en el informe final, además sirve para utilizar el parámetro “Frecuencia nominal” en el apartado “Simulaciones” para poder así, realizar las simulaciones correspondientes con este parámetro.
- **Simulaciones y cálculos:** Se realizan las simulaciones y los cálculos pertinentes para obtener unos parámetros lógicos (según un funcionamiento correcto del palpador) de las diferentes pruebas de caracterización, prueba de sensibilidad y prueba respuesta en frecuencia.
- **Estado del palpador:** En la interfaz, se define el estado del palpador (rojo es defectuoso y verde en buen estado), en caso de palpador defectuoso, se obtiene la cantidad de elementos defectuosos comprendido entre 1 y el 15% de los elementos totales, después, se obtienen los elementos defectuosos, para ello se obtienen valores entre 1 y el número de elementos totales, tantas veces como la cantidad de elementos defectuosos obtenidos anteriormente, a continuación se obtiene el tipo de defecto de cada elemento en mal estado, para ello se obtienen los valores 1, 2 o 3, donde 1 es defecto en el parámetro “Sensibilidad”, 2 defecto en el parámetro “Frecuencia central” y 3, defecto en el parámetro “Ancho de banda”, tras obtener el tipo de defecto se simula un valor 0 o 1 donde 0 significa no hay más defectos y 1 si hay más defectos, por lo tanto se vuelve a simular el tipo de defecto, de esta manera se pueden encontrar así distintos defectos en un mismo elemento. En el Diagrama 6.2.3, Se muestra lo expuesto en este apartado.

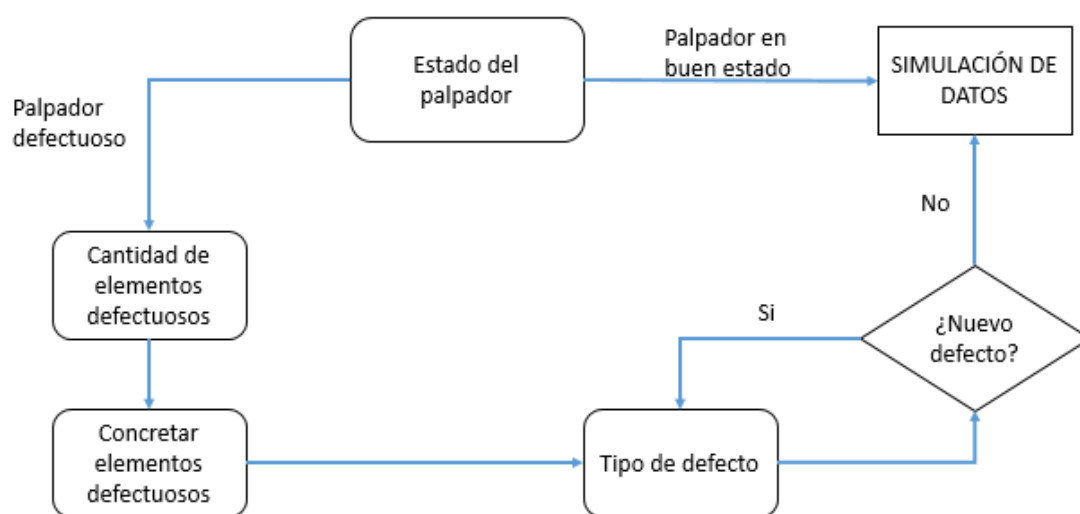


Diagrama 6.2.3, Estado del palpador

En caso de palpador en buen estado se procede directamente a realizar las pruebas descritas a continuación.

- **Prueba de sensibilidad:** El programa muestra la Sensibilidad en dB ( $S_{dB}$ ), manteniendo relación con la sensibilidad en función del % de altura en pantalla ( $S_{\%}$ ), siendo la relación del 100% el máximo de altura en pantalla, correspondiente a 0 dB, por lo tanto la relación entre  $S_{\%}$  y  $S_{dB}$  es la mostrada en la siguiente formula.

$$S_{dB} = 20 \cdot \log_{10}(S_{\%}/100)$$

El programa simula cada elemento con una Sensibilidad entre  $-3,74\text{dB} \leq S_{dB} \leq -0,45\text{dB}$ , lo equivalente a  $65\% \leq S_{\%} \leq 95\%$  de altura en pantalla, se ajustan todos los elementos a una sensibilidad de referencia ( $S_{dB(ref)}$ ) con un valor igual a  $-1,94\text{dB}$  (80% de altura en pantalla), para ello se varía el parámetro ganancia, reflejando este parámetro como sensibilidad de cada elemento ( $S_n$ ), tanto en la interfaz (Gráficas y tabla resumen) como en el informe (Resultados, Gráficas y tabla resumen).

Para obtener  $S_n$  es necesario la ganancia de referencia (G),  $S_{dB(ref)}$  y  $S_{dB}$ , como se indica en la fórmula.

$$S_n = G + S_{dB(ref)} - S_{dB} \rightarrow S_n = G + (-1,94) - S_{dB}$$

Como se muestra en la fórmula, una vez que se tienen  $S_{dB(ref)}$  y  $S_{dB}$ , solo falta explicar el parámetro de ganancia de referencia (G), para obtener la sensibilidad de cada elemento ( $S_n$ ), como se ha indicado en la [tabla 7.2.2](#), la ganancia de los equipos ultrasónicos varía entre  $0\text{dB}$  y  $40\text{dB}$ , para ello se requiere que  $0\text{dB} \leq S_n \leq 40\text{dB}$ , por ello se obtiene (G) como  $1,49\text{dB} \leq G \leq 38,2\text{dB}$ .

En caso de defecto por sensibilidad si  $G \leq 32$ , se calcula como  $S_n' = S_n + 6$ , en caso contrario  $S_n' = S_n - 6$  de esta manera se cumplen los límites  $0\text{dB} \leq S_n' \leq 40\text{dB}$ .

Para un sistema real, el programa debe comunicarse con el equipo de ultrasonidos real y ajustar cada elemento a  $-1,94\text{dB}$  (80% de altura en pantalla), para ello se modifica el parámetro Ganancia y se almacenan estos valores para cada elemento, así se obtiene la Sensibilidad de todos los elementos del palpador.

- Prueba respuesta en frecuencia: Los parámetros característicos de esta prueba son la frecuencia central ( $F_c$ ), el ancho de banda (BW) y el amortiguamiento (AM), para conseguir estos parámetros se tiene que adquirir la frecuencia de corte inferior ( $F_i$ ) y superior ( $F_s$ ), estos se obtienen mediante la transformada de Fourier de la señal, En la [figura 6.2.2](#), se muestra la transformada de Fourier de una señal ultrasónica, en donde se refleja el corte cuando la señal pierde la mitad de su amplitud ( $-6\text{dB}$ ) obtienen de esta manera los parámetros  $F_i$  y  $F_s$ , al carecer de sistema real esto valores deben ser calculados simulando primero los valores de  $F_c$  y BW

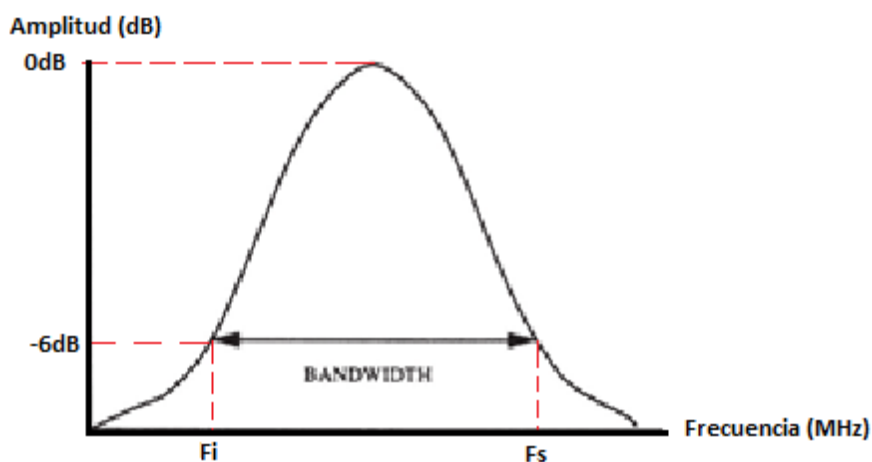


Figura 6.2.2 Parámetros obtenidos sobre la transformada de Fourier

- **Frecuencia central** es la frecuencia característica del palpador, si su funcionamiento es correcto esta debe ser cercana al valor nominal de fabricación, por ello se simula el valor de  $F_c$  de cada elemento como  $0,9 \cdot F_n \leq F_c \leq 1,1 \cdot F_n$ , siendo su fórmula de cálculo para un sistema real como  $F_c = \frac{F_i + F_s}{2}$ .

En caso de defecto la frecuencia central es igual a la frecuencia central obtenida por simulación  $\pm 50\%$  de esta,  $F_c' = F_c \pm 50\%$ .

- **Ancho de banda** es el margen de frecuencias donde la señal mantiene más del 50% de su potencia máxima, en un sistema real se calcula como  $BW = \frac{f_s - f_i}{f_c} \cdot 100 = 2 \cdot \frac{f_s - f_i}{f_s + f_i} \cdot 100$  (%) o como  $BW = F_i - F_s$  (dB), la manera más común de representar el BW es en porcentaje, los valores de ancho de banda más comunes son entre 15% y 100%, por ello el ancho de banda inicial (BW<sub>i</sub>) simulado es  $16,7\% \leq BW_i \leq 90,9\%$ , para todos, individualmente se obtiene como  $0,9 \cdot BW_i \leq BW_s \leq 1,1 \cdot BW_i$ .

En caso de defecto se simula un ancho de banda inicial entre  $31\% \leq BW_i \leq 66,6\%$ , el ancho de banda con defecto será igual al ancho de banda inicial  $\pm 50\%$  de esta, si  $BW_i \leq 60\%$ ,  $BW' = BW_i \cdot 0,5$ , si  $BW_i > 60\%$ ,  $BW' = BW_i \cdot 1,5$ , de esta manera  $15\% \leq BW' \leq 100\%$ .

- **Frecuencias de corte**, una vez simulados los valores de BW y  $F_c$ , se procede a obtener los valores  $F_i$  y  $F_s$ , los cuáles se calculan despejando ambas incógnitas de las formulas  $BW = \frac{f_s - f_i}{f_c} \cdot 100 = 2 \cdot \frac{f_s - f_i}{f_s + f_i} \cdot 100$  y  $F_c = \frac{F_i + F_s}{2}$ . Obteniendo las ecuaciones  $F_i = \left(1 - \frac{BW}{200}\right) \cdot F_s$  y  $F_s = (2 \cdot F_c) - F_i$ .

- **Amortiguamiento (AM)**, es el tiempo que la señal mantiene una potencia superior a 20dB del máximo, es decir mayor al 10% de la potencia máxima, una forma de medición es mediante los semiciclos que la señal se presenta por encima de los 20dB, en la [figura 6.2.3](#), se observa una señal ultrasónica mostrando los semiciclos que están por encima del 10% de altura en pantalla (20 dB).

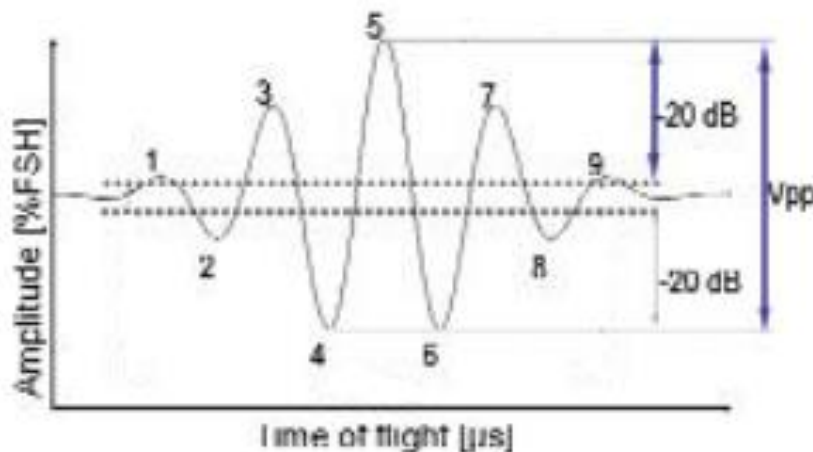


Figura 6.2.3 Amortiguamiento en semiciclos

Para que el número de semiciclos sea coherente con la realidad, en la simulación el número de ciclos obtenidos es en función del ancho de banda como indica la [figura 6.2.4](#), en la que se muestra, la relación existente entre el BW y el amortiguamiento.

En caso de defecto si  $BW_i \leq 60\%$ , entonces  $AM=14$ , si  $BW_i > 60\%$   $AM=2$ .

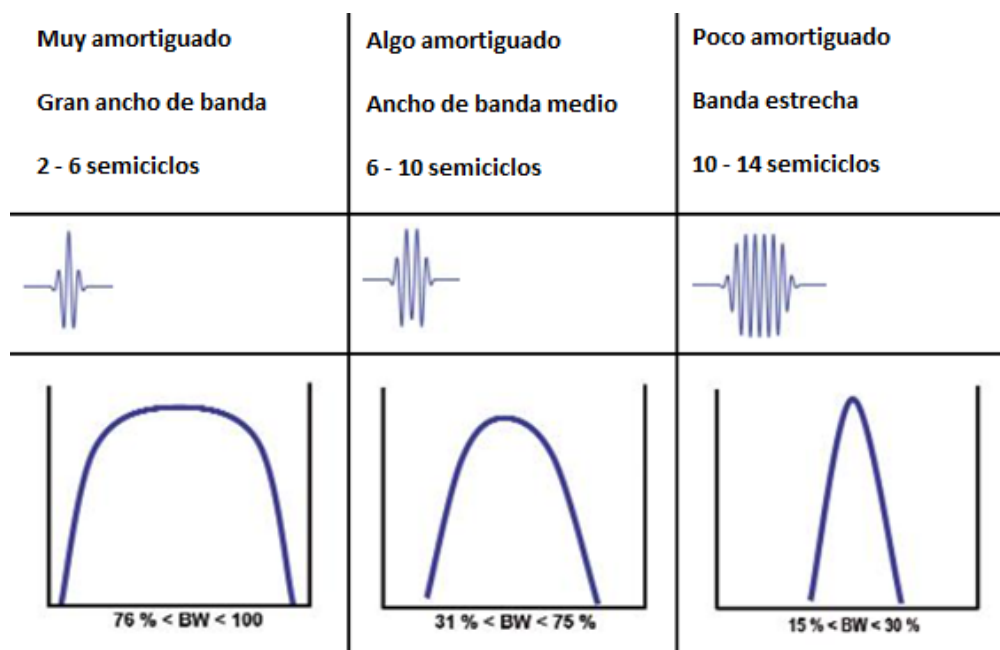


Figura 6.2.4 Amortiguamiento según BW

- Para un sistema real, estas pruebas se realizan mediante la señal en radiofrecuencia (RF) y la transformada de Fourier, los equipos de ultrasonidos son capaces de realizar la transformada de Fourier directamente mediante la señal RF. Como el programa realiza el ajuste al 80% de altura en pantalla de cada elemento, una vez ajustado el programa además de guardar el parámetro ganancia, guarda los datos de la señal RF y de la transformada de Fourier correspondiente a cada elemento, de esta manera se optimiza el tiempo de ejecución. Una vez capturada los datos de la transformada, se obtiene  $F_i$ ,  $F_s$  y con la señal RF se obtiene el amortiguamiento, como se ha indicado anteriormente.
- **Gráficas:** Con todos los parámetros obtenidos se dibujan las diferentes Gráficas las que se utilizan para una mejor interpretación de los resultados obtenidos, el programa genera gráficas en función los parámetros  $S_n$ ,  $f_c$ , BW y AM de cada elemento, siendo estas gráficas visibles en la interfaz antes de generar el informe, lógicamente, también aparecen en el propio informe.
- **Tabla resumen:** Se realiza una tabla donde se detalla el Máximo, mínimo, media y la desviación estándar de los parámetros  $S_n$ ,  $f_c$ , BW y AM de todos los elementos, al igual que sucede con las gráficas, esta tabla aparece primero en la interfaz y posteriormente en el informe.

### 6.2.3.3 Generar informe

Una vez que se completa la simulación, se habilita el botón "GENERAR INFORME", (se puede volver a simular los resultados o generar el informe), al pulsar dicho botón, se genera el informe correspondiente mostrando los datos introducidos en la interfaz, la configuración del equipo (en este caso son también los datos de la interfaz), los resultados obtenidos  $S_n$ ,  $f_c$ , BW, AM,  $F_i$  y  $F_s$  de todos los elementos y las gráficas y tabla resumen mencionadas anteriormente.



Al pulsar el botón “GENERAR INFORME”, se genera el informe en formato Word, a través de la plantilla que se muestra en el ANEXO 1 FORMATO F-001, el cual se divide en tres partes encabezado, contenido y pie de página.

- **Encabezado:** Como se muestran en la [figura 6.2.5](#), se observan los iconos del departamento de electrónica y de la UAH, el título del proyecto y el número de informe, el cual se genera según la fecha con la hora del momento de la generación del informe en formato dd.MM.yy.H.mm (día, mes, año, hora y minutos), de esta manera se asegura que el número de informe no se repite.



Figura 6.2.5 Encabezado

- **Pie de página:** En la [figura 6.2.6](#), se muestra el formato utilizado, como se ha realizado la caracterización y el número de página correspondiente.



Figura 6.2.6 Pie de página

- **Contenido:** Se muestra todos los datos introducidos en la interfaz, (Datos introducidos por el operario y datos del equipo ultrasónico), así como los resultados obtenidos tras las simulaciones y los cálculos (Gráficas, tabla resumen y resultados), aclarando además las abreviaturas utilizadas en el informe.

En el ANEXO 2 INFORME COMPLETO 1, se muestra un informe de una caracterización finalizada para un palpador de 5MHz y 32 elementos.

#### 6.2.3.4 Ejemplo de simulación

En este ejemplo se muestra la parte “RESULTADOS” de la interfaz en donde se observa un palpador con diferentes anomalías, en la [figura 6.2.7](#), se muestra un resumen de los diferentes parámetros obtenidos, de tal manera que se observa que existen anomalías.

TABLA RESUMEN				
	SENSIBILIDAD [dB]	FRECUENCIA [MHz]	ANCHO DE BANDA [%]	AMORTIGUAMIENTO
MÁXIMO	13.9	7.58	56.91	14
MÍNIMO	4.8	4.52	26.00	6
MEDIA	6.8	5.06	51.05	7.5
DESVIACIÓN	2.0	3.98	38.37	11.2

Figura 6.2.7 Tabla resumen

Observando la gráficas de la [figura 6.2.8](#), se comprueba que los elemento 7 y 20 necesitan mayor Sensibilidad para alcanzar la amplitud de referencia que el resto de elementos, lo que puede suponer daños en el elemento piezoeléctrico y/o presentar un problema de acoplamiento entre elementos (depende del estado del palpador según la inspección visual).

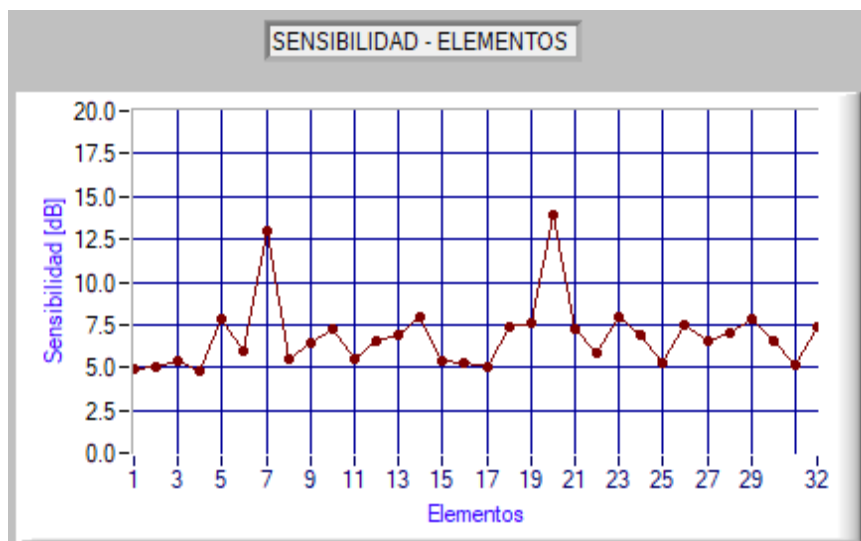


Figura 6.2.8 Ejemplo Sensibilidad-Elementos

En la gráfica de la [figura 6.2.9](#), la frecuencia central el elemento 20 es superior al resto de elementos, lo que indica daños en el elemento piezoeléctrico.

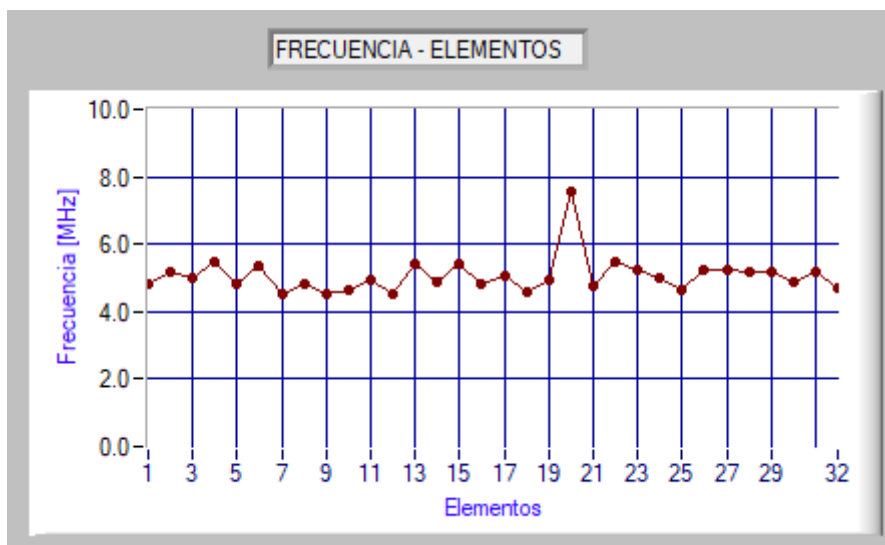


Figura 6.2.9 Ejemplo Frecuencia-Elementos

Por último, según las gráficas de la [figura 6.2.10](#) y la [figura 6.2.11](#), se muestra que los elemento 7 es diferentes al resto, se puede deducir que dichos elementos presentan daños en el material amortiguador.

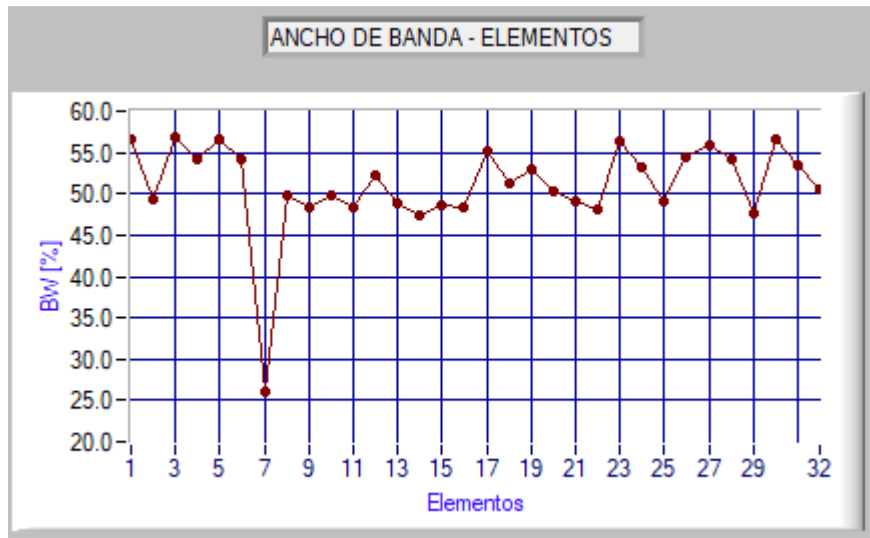


Figura 6.2.10 Ejemplo Ancho de banda-Elementos

Como se ha indicado anteriormente, el ancho de banda está relacionado con el amortiguamiento de la señal, es importante incluir ambas gráficas ya que en algunas ocasiones puede ocurrir el ancho de banda sea distinto pero no se refleje en el amortiguamiento y viceversa.

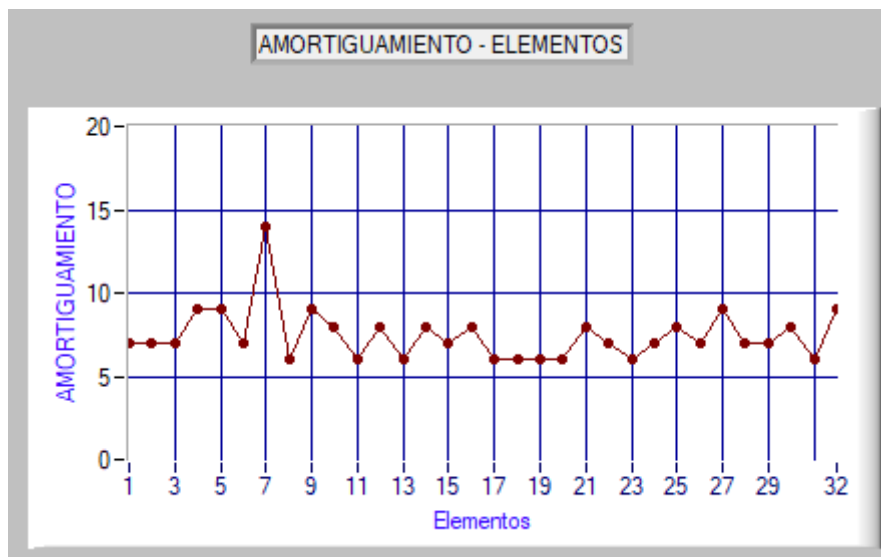


Figura 6.2.11 Ejemplo Amortiguamiento-Elementos

En conclusión para este ejemplo, se ha detectado que el elemento 7 presenta daños en el material amortiguador y además en el piezoeléctrico y/o presentar un problema de acoplamiento entre elementos (depende del estado del palpador según la inspección visual), el elemento 20 presenta daños en el piezoeléctrico y podría además presentar un problema de acoplamiento entre elementos (depende del estado del palpador según la inspección visual).



### 6.3 CONCLUSIÓN

En conclusión, el objetivo de este proyecto es detectar las anomalías en palpadores Phased Array, comprobando los parámetros obtenidos de la señal ultrasónica de los palpadores.

Las ventajas que se presentan, es que se pueden detectar dichas anomalías en un proceso automatizado, con lo que el ahorro de tiempo es más que considerable, lo que se traduce en disminución de costes. Si se tiene en cuenta que la tecnología Phased array está en crecimiento en todos los sectores, no es descabellado pensar que el número de palpadores a evaluar será elevado, por lo que la oferta podría aumentar y podría reducirse el precio, significando un posible aumento del negocio.

Desde el punto de vista del operador, la comodidad aumenta al tratarse de un proceso automatizado se evitan posibles errores en la toma de datos, así como la facilidad del trabajo, además, la formación para la utilización del programa es mínima, por lo tanto, lo recomendable, es tener únicamente conocimientos de ultrasonidos.

### 6.4 TRABAJO FUTURO

En este proyecto es posible realizar mejoras, lo primero es contar con un sistema real, es decir equipos de ultrasonidos Phased Array y ser capaces de comunicar programa con el software de dicho equipo. Partiendo de esta base algunas mejoras significativas serían:

- **Informe bilingüe:** Para facilitar el acceso al mercado internacional, es interesante que los informes se muestren al menos en Español y en Inglés.
- **Certificación según normativa:** Muchos ensayos necesitan certificarse según la norma pertinente a la que se utilice el palpador, cumpliendo requisitos que se indiquen en la normativa y realizando las pruebas que se indican en ella. Como hemos observado con las pruebas realizadas en este proyecto se comprueban el estado del palpador, habría que estudiar la metodología y los criterios de aceptación de la normativa pertinente y aplicarlos al programa.
- **Realización de palpadores convencionales:** Modificar el programa para permitir además realizar las pruebas pertinentes para los palpadores convencionales, también se podría proponer realizar según normativa.
- **Entorno WEB:** Mejorar el programa para trabajar mediante red y ser capaz de realizar la verificación de un palpador desde cualquier ordenador, de esta manera el usuario no necesitaría tener instalado el Software del equipo de adquisición en el mismo ordenador, si no que se comunicaría con este mediante web.
- **Creación Base de datos:** Sería conveniente que el sistema fuera capaz de guardar y cargar automáticamente los datos de las diferentes verificaciones, de esta manera el programa podría comprobar la evolución de los palpadores con el paso del tiempo.



## 7. PLIEGO DE CONDICIONES

Para el desarrollo del proyecto, son necesarios los elementos nombrados a continuación, así como que la instrumentación cumpla los requisitos necesarios para demostrar su fiabilidad en los ensayos realizados.

- **Equipo de ultrasonidos Phased Array:** Se requiere un equipo comercial capaz de cumplir los requisitos descritos en la norma [UNE-EN ISO 18563-1](#) (Caracterización y verificación de los sistemas de ultrasonidos con multielemento con control fase (Phased Array), Parte 1: Instrumentos) o similar, esta norma permite dar una descripción bien definida del equipo de ultrasonidos Phased Array, facilitando el alcance de la verificación y definiendo los criterios de aceptación dentro de un rango de frecuencias de 0,5 MHz a 10 MHz, siendo conveniente que el equipo fuera calibrado al menos una vez al año, según la norma mencionada o similar, además el Software equipo ultrasónico Phased Array debe tener la capacidad de comunicarse con software externo mediante socket TCP/IP o similar.
- **PC:** Ordenador dual-core, con al menos 1 GB de memoria RAM, con Windows 10, es necesario instalar el Microsoft Word (recomendable Word 2010) e instalar el Software Labwindows, programándolo convenientemente para realizar las verificaciones.
- **Cableado:** Para realizar la conexiones pertinentes entre PC y equipos de ultrasonidos es necesario un cableado en buenas condiciones.
- **Manual de usuario:** Antes de realizar cualquier verificación oficial, es necesario tener un manual de usuario, en el cual se indiquen los diferentes pasos para realizar la verificación, este documento será revisado al menos una vez cada 5 años, en caso de alguna modificación en la manera de trabajo, se deberá realizar revisión y modificación de este documento. Este manual se refleja en el apartado [9. MANUAL DE USUARIO](#).

Adicionalmente para realizar una verificación de palpadores, serán necesarios los siguientes elementos, los cuales solo se nombran pero no se especifican debido a que depende del tipo de ensayo y de los palpadores a evaluar:

- **Adaptadores:** Como se ha visto anteriormente (apartado "[6.1.3 PALPADORES DE ULTRASONIDOS](#)") existen diversidad de conectores en los palpadores Phased Array, se emplean para conectar diferentes tipos del palpadores al equipo de ultrasonidos pertinente.
- **Bloques:** Los bloques a emplear son en función del tipo del palpador y de las necesidades del cliente.



## 8. PRESUPUESTO

En este presupuesto se incluyen los elementos necesarios para el desarrollo del software para la evaluación de palpadores descrito en el apartado [7. PLIEGO DE CONDICIONES](#), queda excluido de este presupuesto los elementos adicionales (bloque y adaptadores) ya que el proyecto trata del software para la verificar palpadores, el presupuesto se detalla en la [tabla 8.1](#).

Licencia Labwindows	3.500 €
Ordenador	500 €
Equipo UT + Software UT	30.000 €
Cableado	50 €
Mano de obra	10.160 €

Total 44.210 €

Taba 8.1 Presupuesto

Para la mano de obra se estima una duración de 480 horas (60 días laborables), considerando dos partes “Ingeniero” es el que se encarga del desarrollo del proyecto, estimando un precio de 20 €/hora y el “Responsable” se encarga de establecer los objetivos y es el encargado de que el proyecto se desarrolle de manera satisfactoria se estima un precio de 25 €/hora, las horas dedicadas al proyecto quedan reflejadas en la [tabla 8.2](#).

	Ingeniero	Responsable
Planificación	0 horas	80 horas
Estudio	32 horas	8 horas
Instalación	8 horas	0 horas
Interface	24 horas	0 horas
Informe	24 horas	0 horas
Comunicación	40 horas	0 horas
Adquisición	40 horas	0 horas
Representación	40 horas	0 horas
Manual de usuario	40 horas	0 horas
Validación	80 horas	0 horas
Documento	40 horas	0 horas
Cierre	0 horas	24 horas

Total 368 horas 112 horas  
7360€ 2800€

8.2 Mano de obra



En la tabla 8.2, se muestran los distintos el tiempo estimados para cada apartado, los cuáles se detallan a continuación.

Planificación: Establecer los objetivos del proyecto y crear una estructura de trabajo y la duración estimada de cada proceso.

Estudio: Establecer los elementos necesarios y presupuesto estimado para llevar a cabo el proyecto y aprobación por parte del responsable.

Instalación: Instalación completa tanto del software del programa como del software del equipo UT.

Interface: Crear interface con los campos necesarios.

Informe: Crear informe donde se reflejen los datos acordados en la planificación.

Comunicación: Establecer comunicación entre el programa y el equipo UT.

Adquisición: Adquirir los datos necesarios del equipo de UT.

Representación: Representar correctamente los datos adquiridos en el informe.

Manual de usuario: Es necesario crear un manual de usuario, donde se expliquen claramente, los pasos a seguir para realizar las verificaciones de manera correcta.

Validación: Realización de diversas pruebas para comprobar que se cumplen los objetivos acordados, documentando los resultados obtenidos.

Documentación: Una vez terminado los pasos anteriores se genera un documento donde se especifica el proyecto creado y se pasa al responsable para su revisión.

Cierre: Una vez revisado el documento del proyecto por parte del responsable, ya se puede cerrar el proyecto y comenzar a trabajar con él.

El proyecto parece viable ya con la utilización de ese software se detectan los defectos de los palpadores Phased array de manera rápida y eficaz, teniendo en cuenta que la tecnología Phased array se encuentra en crecimientos en todos los sectores, es fácil pensar que el número de palpadores a evaluar será elevado, también mencionar que el mantenimiento solo requiere la calibración anual del equipo de ultrasonidos, cuyo precio aproximado es de 2000€ anuales (siempre y cuando no se realicen modificaciones y todo funcione como se espera).



## 9. MANUAL DE USUARIO

Con este manual de usuario se pretende establecer las pautas a seguir para realizar una correcta caracterización de palpadores Phased Array.

Lo primero es abrir la interfaz y arrancar el equipo de adquisición, comprobar que todo se encuentra conectado correctamente para iniciar la caracterización, realizar una inspección visual del palpador y a continuación rellenar los distintos apartados de la interfaz (DATOS A INTRODUCIR POR EL OPERARIO y SIMULAR DATOS DEL EQUIPO DE ULTRASONIDOS).

- **Datos a introducir por el operario:** Se deben rellenar los diferentes apartados (DATOS DEL PALPADOR, MEDIOS DEL ENSAYO y DATOS DEL INFORME), como se muestra en el ejemplo de la [figura 9.1](#).

DATOS A INTRODUCIR POR EL OPERARIO		
DATOS DEL PALPADOR	MEDIOS DEL ENSAYO	DATOS DEL INFORME
Número de serie 000001	Bloque Bloque Rexolite, B-002	Cliente UAH
Fabricante Olympus	Medio de acoplamiento Agua	Operario Ángel Verges
Modelo Array lineal	Equipo Tecnatom, FPA E-001	Revisado TFG
Frecuencia nominal [MHz] 5.00	Estado 	
Elementos 32		
SIMULAR GENERAR INFORME		
CERRAR		

Figura 9.1 Datos operario

**DATOS DEL PALPADOR:** En este apartado se rellenan los datos característicos del palpador a caracterizar, los cuáles se detallan en la [tabla 9.1](#).



CAMPO	DESCRIPCIÓN
Número de serie	Identificación del palpador, es única para cada palpador
Fabricante	Nombre de la empresa encargada de la fabricación del palpador
Modelo	Tipo de palpador
Frecuencia nominal [MHz]	Frecuencia con la que está fabricado el palpador, medida en Megahercios.
Número de elementos	Número de elementos que tiene el palpador

Tabla 9.1 Datos del palpador

**MEDIOS DEL ENSAYO:** Indica los medios empleados para realizar la caracterización, en la [tabla 9.2](#) se detallan los diferentes campos.

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Bloque	Bloque empleado para obtener las señales del palpador, se debe indicar el tipo de material y la identificación del bloque
Medio de acoplamiento	Medio empleado para acoplar el palpador y el bloque
Equipo	Equipo de ultrasonidos empleado para la caracterización, se debe indicar fabricante, modelo e identificación del equipo

Tabla 9.2 Medios del ensayo

**DATOS DEL INFORME:** Se reflejan los datos para cumplimentar el informe, en la [tabla 9.3](#) se detallan los diferentes campos.

CAMPO	DESCRIPCIÓN
Cliente	Es el dueño del palpador, a la empresa a quien va dirigida el informe
Operario	Persona que realiza la caracterización, es necesario que tenga al menos una formación básica en ultrasonidos
Revisado	Persona que revisa los informes facilitados por el operario, es necesario al menos una formación media en ultrasonidos

Tabla 9.3 Datos del informe

- **Simular datos del equipo de ultrasonidos:** (Solo en caso de carecer de equipo real), al carecer de un equipo real, en este apartado se simulan los datos característicos de un equipo de ultrasonidos Phased Array, en la [tabla 6.10.4 Simulación equipo Phased Array](#), se detallan estos parámetros, como se muestra en el ejemplo de la [figura 9.2](#).

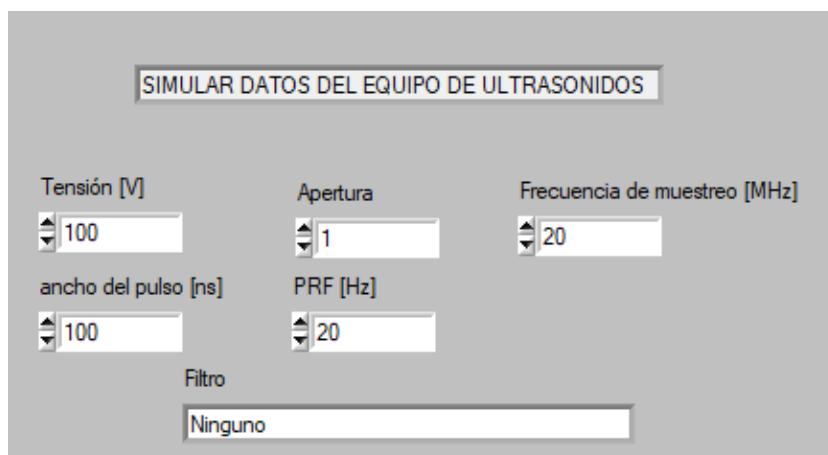


Figura 9.2 Datos del equipo

Parámetro	Descripción
Tensión	Amplitud del impulso eléctrico encargado de excitar al palpador, consisten en impulsos cortos que llegan a cientos de voltios (V), normalmente tiene un valor entre 20v y 400v.
Ancho de pulso	Es la duración del impulso eléctrico, se mide en nanosegundos (ns). Se suele configurar como $Ancho\ de\ pulso = \frac{1}{2 \cdot f}$ donde f es la frecuencia nominal del palpador.
Frecuencia de muestreo	Número de muestras por segundo que se adquieren para realizar la representación, se mide en Megahercios (MHz), normalmente con un valor entre 10MHz y 125MHz.
Filtro	Se utiliza para discriminar una gama de frecuencias.
Frecuencia de repetición de impulsos (PRF)	Como su nombre indica, establece la frecuencia a la que se emiten los pulsos ultrasónicos para muestrear, se mide en Hercios (Hz), normalmente entre 1Hz y 200Hz.
Apertura	Solo para equipos Phased Array, consiste en la cantidad de elementos sobre el que se lleva a cabo el barrido, normalmente entre 1 y 16.

Tabla 6.2.2 Parámetros equipo Phased Array

- **Colocación del palpador:** Una vez rellenada la interfaz (en caso de un sistema real no existiría el apartado “Simular datos del equipo ultrasónica”), se procedería a la colocación del palpador, Para una correcta evaluación es muy importante la colocación del palpador en el bloque adecuado, para verificar su colocación se visualiza en la pantalla del sistema de adquisición la señal a evaluar procedente del palpador, comprobar todos los elementos y en caso de anomalía en algún o algunos de ellos, volver a colocar el palpador para observar si dicha anomalía es problema de acoplamiento o del propio palpador, una vez colocado y observado que todos los elementos se encuentran bien acoplados.

Tras realizar un correcto acoplamiento entre el palpador y el bloque, se configuran los diferentes parámetros que se requieran del sistema de adquisición para una buena visualización de la señal en modo radiofrecuencia (RF) y realizar así el correcto ensayo del palpador.

- **Adquisición:** Posteriormente se procede a iniciar la adquisición, para ello pulsar en el botón “SIMULACIÓN”, el sistema comenzara a realizar las pruebas descritas en el apartado [6.2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO](#) automáticamente, al terminar todas las pruebas, se muestran en la interfaz los resultados obtenidos mediante las diferentes gráficas y la tabla resumen, como se muestra en el ejemplo de la [figura 9.3](#), además se habilita el botón “GENERAR INFORME”, si es necesario realizar de nuevo la adquisición se vuelve a presionar el botón “SIMULACIÓN”, si todo es correcto se pulsa el botón “GENERAR INFORME”, se genera el informe completo en formato Word, cuyo número de informe es dd.MM.yy.H.mm (día, mes, año, hora y minutos).

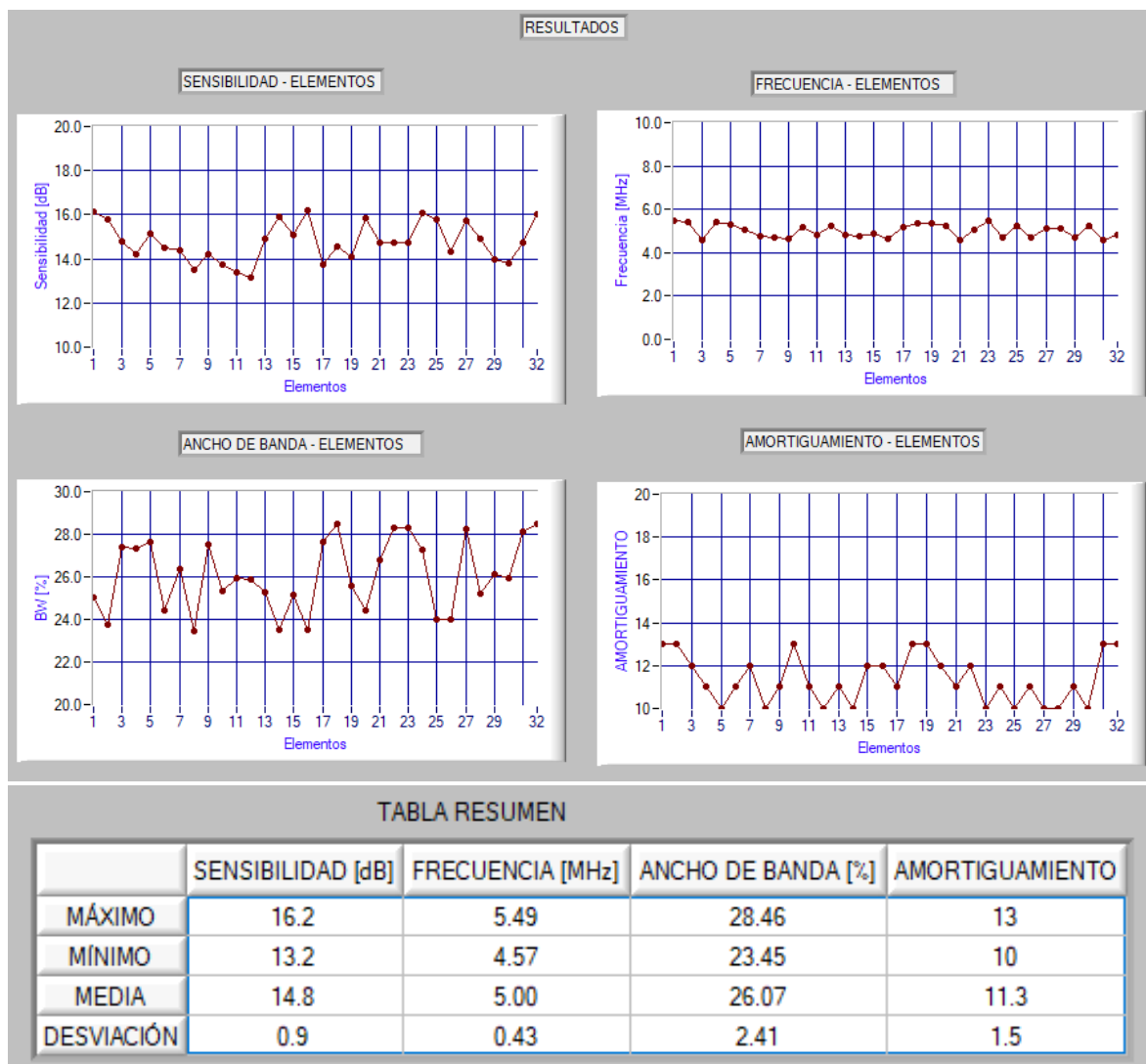


Figura 9.3 Datos obtenidos

- **Informe:** Con el informe generado, el operario (sería conveniente que tuviera como mínimo una formación básica en ultrasonidos), debe comprobar los resultados obtenidos y en caso de ser necesario realizar los ajustes convenientes, en el informe aparece el campo "Observaciones", en este campo el operario debe reflejar las aclaraciones que crea oportunas, posteriormente, la persona que revisa el informe (sería conveniente que tuviera como mínimo una formación media en ultrasonidos), verifica el informe proporcionado por el operario y en caso de discrepancias, se lo comunica al operario para realizar las acciones pertinentes.

Por último, cuando el informe está correcto, se procede a guardarlo, ya que es útil para observar la evolución de los palpadores con el tiempo, siendo conveniente guardarlo en formato Word sin firmar, porque en caso de ser necesario algún cambio que no afecte a los datos medidos estos se pueden cambiar fácilmente, sin necesidad de otra caracterización y en formato PDF firmado, para evitar posibles manipulaciones, una vez comprobado y dado por bueno en Word, se genera el informe en PDF y se procede a firmarlo, primero el operario y por último la persona encargada de revisar el informe, entregando al cliente el PDF firmado, es importante conservarlo por si fuera necesario.



## 10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Curso de nivel I y II en ultrasonidos. Ensia 2014 y 2017
- [2] National Instrument.  
<http://www.ni.com/download/labwindowscvi-full-development-system-2017/6617/en/>  
(Última visita: 03/06/2018)
- [3] Eliana Castañeda Marín, Principios básicos de ultrasonidos  
<http://slideplayer.es/slide/2439976/> (Última visita: 23/05/2018)
- [4] Asbjorn Stoylen, *Basic ultrasound for clinicians*  
[http://folk.ntnu.no/stoylen/strainrate/Basic\\_ultrasound](http://folk.ntnu.no/stoylen/strainrate/Basic_ultrasound) (Última visita: 23/05/2018)
- [5] DASEL, S.L. *Parámetros de un pulso ultrasónico*  
<http://www.daselsistemas.com/index.php/es/conocimientos/ultrasonido-convencional/380-characteristics-of-ultrasonic-beam> (Última visita: 24/05/2018)
- [6] Ángel C. Veca y Ernesto Accolti. *Ultrasonidos para Ingenieros y Estudiantes de Ingeniería*  
[http://dea.unsj.edu.ar/ultrasonido/pdfs/Bibliografia/Usiyei\\_2016.pdf](http://dea.unsj.edu.ar/ultrasonido/pdfs/Bibliografia/Usiyei_2016.pdf)  
(Última visita: 24/05/2018)
- [7] María Elisa Dávila Ruiz, *Procedimiento de evaluación de palpadores Phased Array para la inspección por ultrasonidos de elementos fabricados con materiales compuestos*  
<https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/10062> (Última visita: 02/06/2018)
- [8] Carlos Rubio y Obdulio Marrero, *Fabricación de Transductores Ultrasónicos para Equipos automatizados de inspección de líneas de Tuberías*  
[http://www.ndt.net/article/ndtnet/2010/11\\_Marrero.pdf](http://www.ndt.net/article/ndtnet/2010/11_Marrero.pdf) (Última visita: 30/05/2018)
- [9] Aenor, *UNE-EN ISO 18563-1:2016*  
<http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0056034>  
(Última visita: 01/06/2018)



## ANEXO 1 FORMATO F-001

En este anexo, se muestra la plantilla utilizada para obtener el informe de las diferentes caracterizaciones de palpadores.

# CARACTERIZACIÓN DE PALPADORES PHASED ARRAY

Número de informe:

Datos del palpador:

Número de serie:

Fabricante:

Modelo:

Número de elementos:

Frecuencia nominal: MHz

Cliente:

Fecha de caracterización:

Observaciones:

--

Operario:

Responsable:

# CARACTERIZACIÓN DE PALPADORES PHASED ARRAY

Número de informe:

## Medios del ensayo:

Equipo ultrasónico\*:

\*Equipo ultrasónico verificado según normativa UNE-EN ISO 18563-1 (Caracterización y verificación de los sistemas de ultrasonidos con multielemento con control fase (phased arrays), Parte 1: Instrumentos)

Bloque:

Medio de acoplamiento:

## Configuración del equipo ultrasónico:

Tensión: V

Referencia altura en pantalla: 80 %

Ancho de pulso: ns

Filtro:

Apertura:

PRF: Hz

Frecuencia de muestreo: MHz

## Estadísticas de los resultados:

	Frecuencia central	Ancho de banda	Sensibilidad	Amortiguamiento
Máximo	MHz	%	dB	
Mínimo	MHz	%	dB	
Media	MHz	%	dB	
Desviación	MHz	%	dB	

# **CARACTERIZACIÓN DE PALPADORES PHASED ARRAY**

*Número de informe:*

## **GRÁFICAS**

**Sensibilidad - Elementos**

**Frecuencia central - Elementos**



# **CARACTERIZACIÓN DE PALPADORES PHASED ARRAY**

*Número de informe:*

## **GRÁFICAS**

**Ancho de banda - Elementos**

**Amortiguamiento - Elementos**

# CARACTERIZACIÓN DE PALPADORES PHASED ARRAY

Número de informe:

## RESULTADOS

Elemento	$F_i$ [MHz]	$F_s$ [MHz]	$F_c$ [MHz]	BW[%]	Amort.	$S_n$ [dB]

## ABREVIATURAS

$F_i$  [MHz]: Frecuencia de corte inferior a -6dB, medida en megahercios.

$F_s$  [MHz]: Frecuencia de corte superior a -6dB, medida en megahercios.

$F_c$  [MHz]: Frecuencia central, medida en megahercios.

BW [%]: Ancho de banda a -6dB, medida en porcentaje.

Amort.: Amortiguamiento.

$S_n$  [dB]: Sensibilidad, medida en decibelios.



## ANEXO 2 INFORME COMPLETO

Se observa un informe completo, de un palpador Phased Array en buen estado con 32 elementos y 5MHz.



## CARACTERIZACIÓN DE PALPADORES PHASED ARRAY

Número de informe: 03.06.18.17.52

Datos del palpador:

Número de serie:	000001
Fabricante:	Olympus
Modelo:	Array lineal
Número de elementos:	32
Frecuencia nominal:	5.00 MHz
Cliente:	UAH
Fecha de caracterización:	03/06/2018

Observaciones:

--

Operario: Ángel Verges

*Responsable:* TFG

# CARACTERIZACIÓN DE PALPADORES PHASED ARRAY

Número de informe: 03.06.18.17.52

## Medios del ensayo:

Equipo ultrasónico\*:

Tecnatom, FPA E-001

\*Equipo ultrasónico verificado según normativa UNE-EN ISO 18563-1 (Caracterización y verificación de los sistemas de ultrasonidos con multielemento con control fase (phased arrays), Parte 1: Instrumentos)

Bloque:

Bloque Rexolite, B-002

Medio de acoplamiento:

Agua

## Configuración del equipo ultrasónico:

Tensión:

100 V

Referencia altura en pantalla:

80 %

Ancho de pulso:

100 ns

Filtro:

Ninguno

Apertura:

1

PRF:

20 Hz

Frecuencia de muestreo:

20 MHz

## Estadísticas de los resultados:

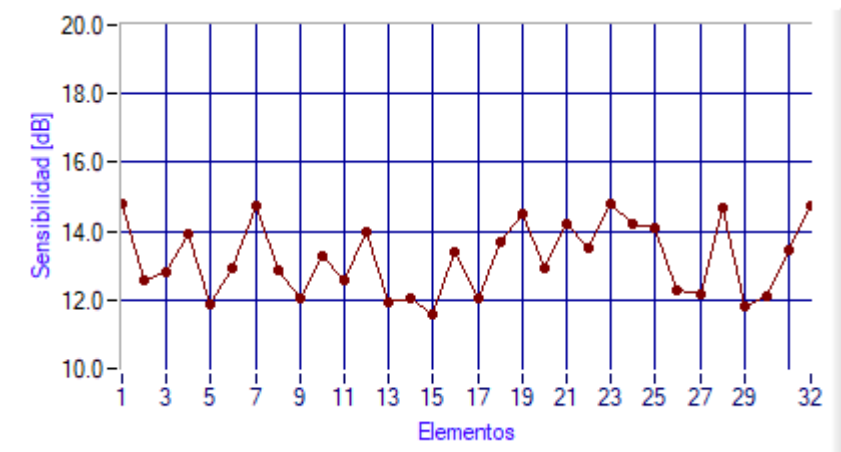
	Frecuencia central	Ancho de banda	Sensibilidad	Amortiguamiento
Máximo	5.49 MHz	45.44 %	14.8 dB	9
Mínimo	4.50 MHz	38.21 %	11.6 dB	6
Media	5.02 MHz	41.37 %	13.2 dB	7.7
Desviación	0.69 MHz	6.35 %	1.0 dB	2.0

# CARACTERIZACIÓN DE PALPADORES PHASED ARRAY

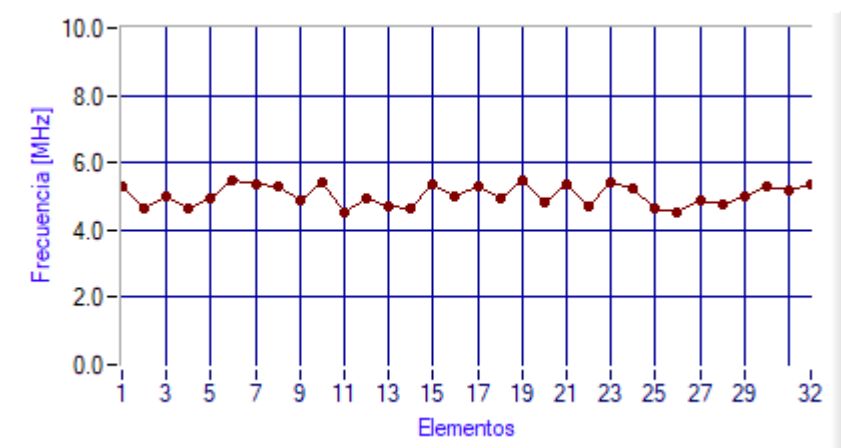
Número de informe: 03.06.18.17.52

## GRÁFICAS

Sensibilidad - Elementos



Frecuencia central - Elementos

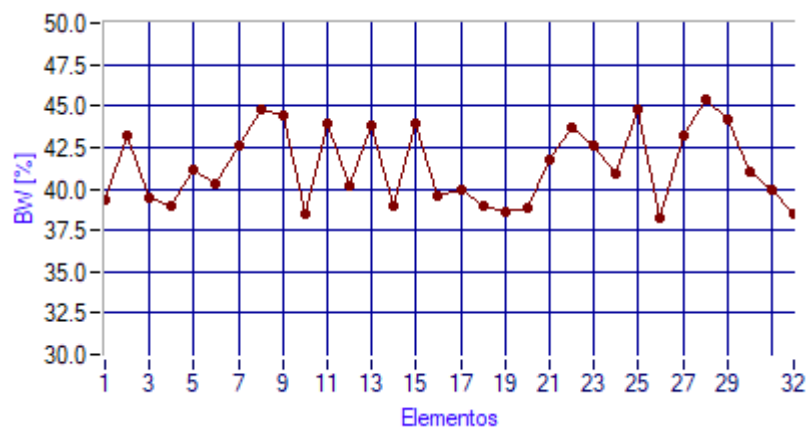


# CARACTERIZACIÓN DE PALPADORES PHASED ARRAY

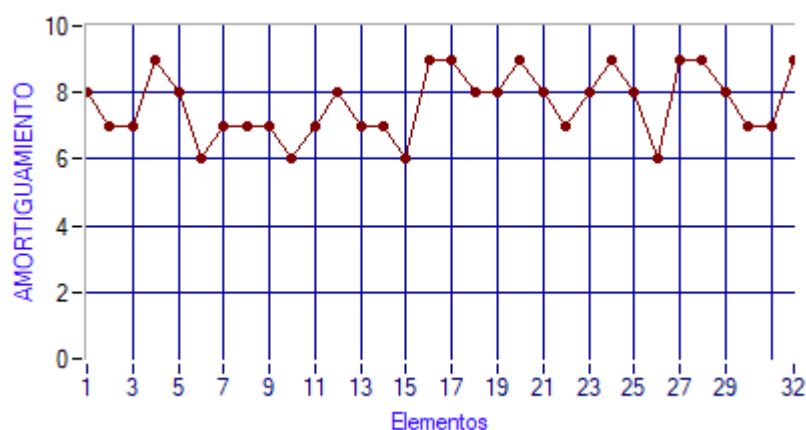
Número de informe: 03.06.18.17.52

## GRÁFICAS

Ancho de banda - Elementos



Amortiguamiento - Elementos



# CARACTERIZACIÓN DE PALPADORES PHASED ARRAY

Número de informe: 03.06.18.17.52

## RESULTADOS

Elemento	$F_i$ [MHz]	$F_s$ [MHz]	$F_c$ [MHz]	BW[%]	Amort.	$S_n$ [dB]
1	4.23	6.31	5.27	39.34	8	14.8
2	3.62	5.62	4.62	43.25	7	12.5
3	3.99	5.95	4.97	39.41	7	12.8
4	3.72	5.53	4.63	39.02	9	13.9
5	3.93	5.96	4.94	41.09	8	11.9
6	4.39	6.60	5.49	40.27	6	12.9
7	4.20	6.47	5.34	42.63	7	14.7
8	4.10	6.46	5.28	44.84	7	12.8
9	3.79	5.96	4.88	44.40	7	12.1
10	4.38	6.46	5.42	38.47	6	13.2
11	3.52	5.51	4.51	43.95	7	12.6
12	3.94	5.92	4.93	40.24	8	14.0
13	3.69	5.75	4.72	43.80	7	12.0
14	3.74	5.55	4.65	38.97	7	12.0
15	4.18	6.54	5.36	43.93	6	11.6
16	4.02	6.01	5.01	39.56	9	13.4
17	4.25	6.37	5.31	39.97	9	12.1
18	3.97	5.90	4.94	38.96	8	13.7
19	4.40	6.50	5.45	38.57	8	14.5
20	3.87	5.74	4.80	38.81	9	12.9
21	4.23	6.46	5.35	41.76	8	14.2



# **CARACTERIZACIÓN DE PALPADORES PHASED ARRAY**

Número de informe: 03.06.18.17.52

<i>Elemento</i>	<i>Fi [MHz]</i>	<i>Fs [MHz]</i>	<i>Fc [MHz]</i>	<i>BW[%]</i>	<i>Amort.</i>	<i>Sn[dB]</i>
22	3.69	5.74	4.71	43.66	7	13.5
23	4.25	6.55	5.40	42.64	8	14.8
24	4.17	6.32	5.25	40.90	9	14.2
25	3.61	5.69	4.65	44.78	8	14.1
26	3.64	5.36	4.50	38.21	6	12.3
27	3.83	5.95	4.89	43.26	9	12.2
28	3.67	5.84	4.76	45.44	9	14.7
29	3.88	6.09	4.98	44.22	8	11.8
30	4.20	6.36	5.28	41.00	7	12.1
31	4.13	6.20	5.17	39.98	7	13.5
32	4.32	6.38	5.35	38.44	9	14.7

## **ABREVIATURAS**

*Fi [MHz]*: Frecuencia de corte inferior a -6dB, medida en megahercios.

*Fs [MHz]*: Frecuencia de corte superior a -6dB, medida en megahercios.

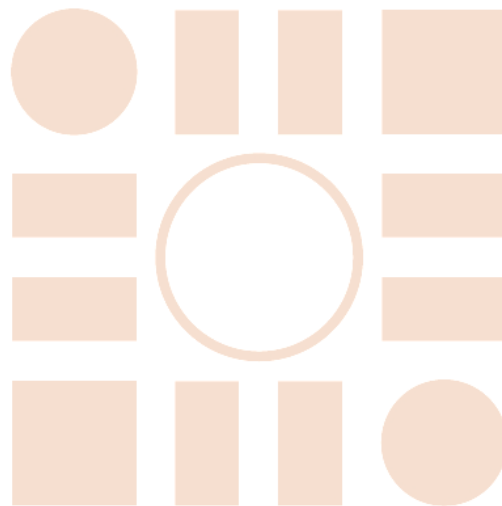
*Fc [MHz]*: Frecuencia central, medida en megahercios.

*BW [%]*: Ancho de banda a -6dB, medida en porcentaje.

*Amort.*: Amortiguamiento.

*Sn [dB]*: Sensibilidad, medida en decibelios.

Universidad de Alcalá  
Escuela Politécnica Superior



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR



Universidad  
de Alcalá